

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ROBINSON PLOSZAI

ANÁLISE DE TENDÊNCIAS NO REGIME DE CHUVAS EM CURITIBA  
USANDO CENÁRIOS DE MODELOS CLIMÁTICOS REGIONAIS

CURITIBA

2014

ROBINSON PLOSZAI

ANÁLISE DE TENDÊNCIAS NO REGIME DE CHUVAS EM CURITIBA  
USANDO CENÁRIOS DE MODELOS CLIMÁTICOS REGIONAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos e Ambiental, Área de Concentração em Engenharia de Recursos Hídricos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Miriam Rita Moro Mine

CURITIBA

2014

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu gostaria de agradecer ao universo, por ter me proporcionado uma nova maneira de viver. Apenas após alguns *insights* foi possível parar a beleza.

Agradeço aos meus pais Alfonso e Irmgard Maria Mallon Ploszai, e aos irmãos Etiane Ploszai, Ricardo Beiler, Clécio Zeithammer e Fábio Braga. E a todos os meus amigos que sempre estiveram presentes.

Agradeço à minha orientadora Miriam Rita Moro Mine pela dedicação, paciência, acompanhamento e amizade. Também agradeço ao professor Heinz Dieter Oskar August Fill, pelo apoio, dedicação e amizade.

Agradeço a todos meus amigos que estiveram comigo nesta jornada e aos professores e colegas do PPGERHA que participaram desta parcela da minha história, tão enriquecedora e sensacional.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	VI
ABSTRACT .....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS .....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS .....	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XVI
INTRODUÇÃO .....	1
OBJETIVOS .....	3
OBJETIVO GERAL .....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
HIPÓTESE .....	3
ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
1. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
1.1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS RECURSOS HÍDRICOS .....	4
1.2. SISTEMAS DINÂMICOS.....	9
1.3. PROCESSOS ESTOCÁSTICOS .....	10
1.4. HOMOCEDASTICIDADE .....	11
1.5. ERGODICIDADE.....	12
1.6. ESTACIONARIEDADE .....	12
1.7. MODELOS .....	14
1.7.1. Modelos Hidrológicos.....	14
1.7.1.1. Modelo ETA.....	17
1.7.1.2. Modelo PROMES .....	18
1.7.1.3. Modelo RCA1 .....	18
1.7.2. Correção de bias.....	19
1.8. FORMAS DE PRECIPITAÇÃO .....	20
1.8.1. Precipitações Convectivas .....	21
1.8.2. Precipitações Frontais ou Ciclônicas.....	22
1.8.3. Precipitações Orográficas .....	22
1.9. ANÁLISE DOS DADOS .....	23
1.9.1. Análise Preliminar.....	23
1.9.2. EDA (Exploratory Data Analysis).....	24
1.9.3. Análise de Tendências.....	26
1.9.3.1. Estudos Realizados .....	27
1.10. RESUMO DO CAPÍTULO .....	33
2. MÉTODOS .....	35
2.1. EDA (EXPLORATORY DATA ANALYSIS).....	35
2.1.1. Análises gráficas.....	36
2.1.2. Curva Acumulativa.....	36
2.1.3. Histograma de Frequências .....	36
2.1.4. Polígono de Frequências .....	37
2.1.5. Curvas de Permanência.....	37
2.1.6. Frequências Empíricas Acumuladas – FEA .....	38
2.2. INDICADORES ESTATÍSTICOS .....	38
2.2.1. Coeficiente de Determinação.....	38
2.2.2. Coeficiente de Nash-Sutcliffe .....	39

2.2.3.	<i>RMSE (Root-Mean-Square Error)</i> .....	40
2.2.4.	<i>Outros indicadores estatísticos</i> .....	41
2.2.5.	<i>Método de correção de bias</i> .....	42
2.3.	REGRESSÃO LINEAR .....	43
2.4.	MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS .....	45
2.5.	FUNÇÕES SUAVIZADORAS .....	45
2.6.	REGRESSÃO LOWESS ( <i>LOCALLY WEIGHTED SCATTERPLOT SMOOTHING</i> ) 46	
2.7.	RAPS ( <i>RESCALED ADJUSTED PARTIAL SUMS</i> ) .....	47
2.8.	TESTES ESTATÍSTICOS.....	48
2.8.1.	<i>Testes Paramétricos</i> .....	48
2.8.1.1.	Teste t de Student .....	49
2.8.1.2.	Teste F de Snedecor .....	49
2.8.2.	<i>Testes Não Paramétricos</i> .....	50
2.8.2.1.	Teste do coeficiente de Spearman .....	51
2.8.2.2.	Teste de Wilcoxon ou Mann-Whitney .....	52
2.8.2.3.	Teste de Mann Kendall .....	53
2.8.2.4.	Teste de Mann Kendall Sazonal .....	55
2.9.	RESUMO DO CAPÍTULO .....	56
3.	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E DADOS UTILIZADOS .....	57
3.1.	CURITIBA .....	57
3.2.	BACIA DO RIO IGUAÇU.....	60
3.3.	DADOS UTILIZADOS.....	61
3.4.	RESUMO DO CAPÍTULO .....	62
4.	ANÁLISE DOS DADOS .....	63
4.1.	ANÁLISE DO PERÍODO HISTÓRICO.....	63
4.1.1.	<i>Correção de bias</i> .....	65
4.1.2.	<i>EDA</i> .....	65
4.1.3.	<i>Resultados obtidos no Período Histórico</i> .....	80
4.2.	RESUMO DO CAPÍTULO .....	80
5.	ANÁLISES DOS CENÁRIOS DE PRECIPITAÇÃO.....	82
5.1.	ANÁLISE ANUAL .....	82
5.2.	ANÁLISE SAZONAL .....	97
5.2.1.	<i>Análise Semestral – 2 Estações (Verão e Inverno)</i> .....	98
5.2.2.	<i>Análise Trimestral – Estações do ano</i> .....	108
5.2.3.	<i>Análise Mensal</i> .....	119
5.3.	RESULTADO DAS ANÁLISES .....	128
5.4.	RESUMO DO CAPÍTULO .....	129
	CONCLUSÕES .....	131
	RECOMENDAÇÕES .....	133
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	134
	APÊNDICES.....	142

## RESUMO

Busca-se neste projeto analisar as tendências do regime de chuvas na região metropolitana de Curitiba no contexto de mudanças climáticas. Utilizando modelos climáticos regionais (RCM) e testes estatísticos para analisar a tendência das chuvas regionais, é possível analisar o comportamento futuro das precipitações de médio e de longo termo. Assumindo que o clima é um fator condicionante fundamental no desenvolvimento socio-econômico da população, foi escolhida a região de Curitiba por ser um grande polo econômico e social da região sul do Brasil. Além disso, dispõem-se no local, de observações de chuvas desde 1889 (com algumas interrupções), permitindo uma análise de longo prazo das tendências. Assim, podem-se desenvolver ferramentas que estabeleçam medidas preventivas contra o impacto das mudanças climáticas. Foi realizada a análise de consistência dos cenários de precipitação no período histórico, utilizando a série hidrológica da estação Curitiba e os cenários gerados por três RCM (ETA, PROMES e RCA1). Depois de identificado que o modelo ETA é o mais representativo para a região, realizou-se a análise anual e sazonal para identificação de tendências nas séries. A análise de tendência foi dividida em: (1) período histórico das chuvas observadas; (2) período histórico do cenário das chuvas gerado pelo modelo ETA; (3) período futuro do cenário de chuvas gerado pelo modelo ETA. Para isso, foram aplicados: análise exploratória dos dados (cálculo das estatísticas descritivas e elaboração de diagramas); testes estatísticos (rho de Spearman, Mann Whitney, t de Student, F de Snedecor, Mann Kendall e Mann Kendall Sazonal); regressões (linear e LOWESS), método RAPS e variação da média e mediana móvel. Os resultados apontaram uma ligeira tendência de acréscimo nas chuvas em Curitiba até 2013 e uma tendência de acréscimo nas chuvas pouco depois da metade do século XXI.

Palavras-chave: séries de precipitação, cenários de precipitação, modelos climáticos regionais, tendências nas precipitações.

## ABSTRACT

This project aims at analysing rainfall trends at the metropolitan region of Curitiba, in the context of climate change. Using regional climate models (RCM) and statistical tests to analyse the regional rainfall trend, it is possible, to make some statements about the future behaviour of the middle and long term precipitations. Assuming that climate is a fundamental factor to population's socio-economic development, the region of Curitiba was chosen for the analysis because it is a large economic and social centre at South Brazil. The availability of long term rainfall observations since 1889 (with some interruptions) was another reason for this choice. Hence, it will be possible to develop tools that allow measures against future climate changes impacts. The consistence analysis of precipitation background has been realized for the historical period, using the hydrological data of Curitiba station and the scenarios generated by three RCM (ETA, PROMES and RCA1). After identifying the ETA model as the most representative of the region, the annual and seasonal analysis have been realized to identify trends in the series. The trend analysis was split in: (1) historical period of observed data; (2) historical period of the rainfall generated by ETA model; (3) future period of the rainfall generated by ETA model. To do this, it was applied: Exploratory Data Analysis (calculation of descriptive statistics and making diagrams), statistical tests (Spearman's rho, Mann Whitney, t-test, F – Snedecor, Mann Kendall and Seasonal Mann Kendall); regressions (linear and LOWESS), RAPS method and moving mean and median variation. The results indicated slight trend increase of rainfall in Curitiba up to 2013 and an increase a few years after the middle of the 21st century.

Key-words: rainfall series, precipitation background; regional climate models; rainfall trends.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização dos principais rios, capital e estação pluviométrica Curitiba (Fonte: O autor, 2014).....	59
Figura 2 – Bacia do rio Iguaçu, principais rios, localização da capital e estação pluviométrica Curitiba (Fonte: O autor, 2014).....	61
Figura 3 – Histograma de chuvas mensais observadas (Fonte: O Autor, 2014). .....	66
Figura 4 – Histograma de chuvas mensais obtidas pelo modelo ETA (Fonte: O Autor, 2014).....	66
Figura 5 – Histograma de chuvas mensais obtidas pelo modelo PROMES (Fonte: O Autor, 2014). ....	67
Figura 6 – Histograma de chuvas mensais obtidas pelo modelo RCA1 – 01 (Fonte: O Autor, 2014). ....	68
Figura 7 – Histograma de chuvas mensais obtidas pelo modelo RCA1 – 02 (Fonte: O Autor, 2014). ....	69
Figura 8 – Histograma de chuvas mensais obtidas pelo modelo RCA1 – 03 (Fonte: O Autor, 2014). ....	69
Figura 9 – Polígonos de frequência de todos os cenários e modelos (Fonte: O Autor, 2014).....	71
Figura 10 – Correlação de chuvas observadas <i>versus</i> modelo ETA (Fonte: O Autor, 2014).....	72
Figura 11 – Correlação de chuvas observadas <i>versus</i> modelo PROMES (Fonte: O Autor, 2014).....	73
Figura 12 – Correlação de chuvas observadas <i>versus</i> modelo RCA1 – 01 (Fonte: O Autor, 2014). ....	73
Figura 13 – Correlação de chuvas observadas <i>versus</i> modelo RCA1 – 02 (Fonte: O Autor, 2014). ....	74
Figura 14 – Correlação de chuvas observadas <i>versus</i> modelo RCA1 – 03 (Fonte: O Autor, 2014). ....	74
Figura 15 – Estudo das Frequências Empíricas Acumuladas das chuvas máximas mensais anuais de todas as séries (Fonte: O Autor, 2014). ....	77



Figura 16 – Estudo das Frequências Empíricas Acumuladas das chuvas mínimas mensais anuais de todas as séries (Fonte: O Autor, 2014). .....	78
Figura 17 – Curvas de Permanência de todos os cenários (Fonte: O Autor, 2014). .....	79
Figura 18 – Curvas de Permanência dos cenários mais apropriados (Fonte: O Autor, 2014). .....	79
Figura 19 – Gráficos dos totais anuais precipitados para OBS (Fonte: O Autor, 2014). .....	84
Figura 20 – Gráficos dos totais anuais precipitados para o ETA01 (Fonte: O Autor, 2014). .....	85
Figura 21 – Gráficos dos totais anuais precipitados para o ETA02 (Fonte: O Autor, 2014). .....	85
Figura 22 – RAPS dos totais anuais precipitados em OBS (Fonte: O Autor, 2014). .....	88
Figura 23 – RAPS dos totais anuais precipitados em ETA01 (Fonte: O Autor, 2014). .....	89
Figura 24 – RAPS dos totais anuais precipitados em ETA02 (Fonte: O Autor, 2014). .....	90
Figura 25 – Curva de totais anuais precipitados acumulados em OBS (Fonte: O Autor, 2014). .....	91
Figura 26 – Curva de totais anuais precipitados acumulados em ETA01 (Fonte: O Autor, 2014). .....	91
Figura 27 – Curva de totais anuais precipitados acumulados em ETA02 (Fonte: O Autor, 2014). .....	92
Figura 28 – Curvas de totais anuais precipitados acumulados (Fonte: O Autor, 2014). .....	92
Figura 29 – Gráficos dos totais semestrais precipitados no verão para OBS (Fonte: O Autor, 2014). .....	100
Figura 30 – Gráficos dos totais semestrais precipitados no verão para ETA01 (Fonte: O Autor, 2014). .....	100

Figura 31 – Gráficos dos totais semestrais precipitados no verão para ETA02 (Fonte: O Autor, 2014). .....	101
Figura 32 – RAPS dos totais semestrais precipitados (verão – OBS) (Fonte: O Autor, 2014).....	103
Figura 33 – RAPS dos totais semestrais precipitados (verão – ETA01) (Fonte: O Autor, 2014).....	104
Figura 34 – RAPS dos totais semestrais precipitados (verão – ETA02) (Fonte: O Autor, 2014).....	104
Figura 35 – Gráficos dos totais trimestrais precipitados no verão para OBS (Fonte: O Autor, 2014). .....	110
Figura 36 – Gráficos dos totais trimestrais precipitados no verão para ETA01 (Fonte: O Autor, 2014). .....	110
Figura 37 – Gráficos dos totais trimestrais precipitados no verão para ETA02 (Fonte: O Autor, 2014). .....	111
Figura 38 – RAPS dos totais trimestrais precipitados (verão – OBS) (Fonte: O Autor, 2014).....	114
Figura 39 – RAPS dos totais trimestrais precipitados (verão – ETA01) (Fonte: O Autor, 2014).....	114
Figura 40 – RAPS dos totais trimestrais precipitados (verão – ETA02) (Fonte: O Autor, 2014).....	115
Figura 41 – Gráficos dos totais mensais precipitados em OBS (Fonte: O Autor, 2014). .....	120
Figura 42 – Gráficos dos totais mensais precipitados em ETA01 (Fonte: O Autor, 2014).....	121
Figura 43 – Gráficos dos totais mensais precipitados em ETA02 (Fonte: O Autor, 2014).....	121
Figura 44 – RAPS dos totais mensais precipitados (OBS) (Fonte: O Autor, 2014). .....	123
Figura 45 – RAPS dos totais mensais precipitados (ETA01) (Fonte: O Autor, 2014). .....	124

Figura 46 – RAPS dos totais mensais precipitados (ETA02) (Fonte: O Autor, 2014).....	124
--	-----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da estação pluviométrica Curitiba (Fonte: O Autor, 2014). .	59
Tabela 2 – Levantamento de falhas no período histórico (Fonte: O Autor, 2014). .....	64
Tabela 3 – Índices estatísticos das séries de precipitações mensais do período histórico (1961 – 2008) (Fonte: O Autor, 2014). ....	75
Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos totais anuais precipitados (Fonte: O Autor, 2014). ....	83
Tabela 5 – Equações de regressão linear para os totais anuais precipitados (Fonte: O Autor, 2014). ....	86
Tabela 6 – Resultado do teste de hipótese do coeficiente angular da reta de regressão linear (Fonte: O Autor, 2014). ....	87
Tabela 7 – Possíveis anos onde ocorreram alterações na média (Fonte: O Autor, 2014). ....	94
Tabela 8 – Resultados dos testes estatísticos t e F (Divisão em cada ano onde foram observadas alterações na média) (Fonte: O Autor, 2014). ....	94
Tabela 9 – Resultados dos testes estatísticos U e rho (Divisão em cada ano onde foram observadas alterações na média) (Fonte: O Autor, 2014). ....	96
Tabela 10 – Análise das precipitações anuais - Mann Kendall ( $\alpha = 5\%$ ) Aceita $H_0$ : $Z(\text{tab.}) = 1,96$ (Fonte: O Autor, 2014). ....	96
Tabela 11 – Estatísticas descritivas dos totais semestrais precipitados no verão (Fonte: O Autor, 2014). ....	99
Tabela 12 – Equações de regressão linear para os totais semestrais precipitados no verão (Fonte: O Autor, 2014). ....	101
Tabela 13 – Resultado do teste de hipótese do coeficiente angular da reta de regressão linear (Fonte: O Autor, 2014). ....	102
Tabela 14 – Possíveis anos onde ocorreram alterações na média (Fonte: O Autor, 2014). ....	105
Tabela 15 – Resultados dos testes estatísticos U e rho (Divisão em cada ano onde foram observadas alterações na média) (Fonte: O Autor, 2014). ....	106

Tabela 16 – Análise das precipitações semestrais (verão) - Mann Kendall Sazonal ( $\alpha = 5\%$ ) Aceita $H_0$ : $Z(\text{tab.}) = 1,96$ (Fonte: O Autor, 2014).....	107
Tabela 17 – Estatísticas descritivas dos totais trimestrais precipitados no verão (Fonte: O Autor, 2014). ....	109
Tabela 18 – Equações de regressão linear para os totais trimestrais precipitados no verão (Fonte: O Autor, 2014). ....	112
Tabela 19 – Resultado do teste de hipótese do coeficiente angular da reta de regressão linear (Fonte: O Autor, 2014).....	112
Tabela 20 – Possíveis anos onde ocorreram alterações na média (Fonte: O Autor, 2014).....	116
Tabela 21 – Resultados dos testes estatísticos U e rho (Divisão em cada ano onde foram observadas alterações na média) (Fonte: O Autor, 2014).....	117
Tabela 22 – Análise das precipitações trimestrais (verão) - Mann Kendall Sazonal ( $\alpha = 5\%$ ) Aceita $H_0$ : $Z(\text{tab.}) = 1,96$ (Fonte: O Autor, 2014).....	118
Tabela 23 – Estatísticas descritivas dos totais mensais precipitados (Fonte: O Autor, 2014).....	119
Tabela 24 – Equações de regressão linear para os totais mensais precipitados (Fonte: O Autor, 2014). ....	122
Tabela 25 – Resultado do teste de hipótese do coeficiente angular da reta de regressão linear (Fonte: O Autor, 2014).....	122
Tabela 26 – Possíveis anos onde ocorreram alterações na média (Fonte: O Autor, 2014).....	125
Tabela 27 – Resultados dos testes estatísticos U e rho (Divisão em cada ano onde foram observadas alterações na média) (Fonte: O Autor, 2014).....	126
Tabela 28 – Análise das precipitações mensais - Mann Kendall Sazonal ( $\alpha = 5\%$ ) Aceita $H_0$ : $Z(\text{tab.}) = 1,96$ (Fonte: O Autor, 2014). ....	127
Tabela 29 – Resultados de todas as análises (Fonte: O Autor, 2014). ....	128

## LISTA DE ABREVIATURAS

A1B	Cenário climático mundial (IPCC)
ANA	Agência Nacional de Águas
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CMA	<i>China Meteorology Administration</i>
e.g.	<i>exempli gratia</i>
<i>et al.</i>	<i>et alii</i>
EDA	<i>Exploratory Data Analysis</i>
ENSO	<i>El-Niño/Southern-Oscillation</i>
ETA	<i>Estimated Time of Arrival</i>
ETA01	Cenário de chuvas do modelo ETA no período passado
ETA02	Cenário de chuvas do modelo ETA no período futuro
EUA	Estados Unidos da América
EXCEL	Editor de planilhas da Microsoft
FEA	Frequências Empíricas Acumuladas
FDA	Função de Distribuição Acumulada
GCM	<i>Global Climate Model</i>
HC	<i>Hadley Centre</i>
<i>Hidroweb</i>	Sistema de informações Hidrológicas
HIRLAM	<i>High Resolution Limited Area Model</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>

LOWESS	<i>Locally Weighted Scatterplot Smoothing</i>
LPB	<i>La Plata Basin</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MK	Mann Kendall
MKS	Mann Kendall Sazonal
MPI	<i>Max-Planck Institute</i>
NS	<i>Nash-Sutcliffe</i>
OBS	Cenário de chuvas Observadas
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PIB	Produto Interno Bruto
PROMES	<i>Prognostic Mesoscale</i>
RAPS	<i>Rescaled Adjusted Partial Sums</i>
RCA1	<i>Rosby Centre Regional Atmospheric Climate Model</i>
RCM	<i>Regional Climate Model</i>
RMC	Região Metropolitana de Curitiba
RMSE	<i>Root-Mean-Square Error</i>
STATISTICA	Programa estatístico da <i>Statsoft</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$z$	Resultado de um experimento aleatório;
$t$	Variável aleatória que representa o tempo;
$N$	Tamanho da amostra;
$NC$	Número de Classes;
$m$	Cada valor da ordem de classificação em ordem decrescente;
$n$	Número total de dados observados de chuva;
$F$	Probabilidade de ocorrência das chuvas;
$\rho$	Coeficiente de correlação;
$\sigma_{X,Y}$	Covariância entre as variáveis $X$ e $Y$ ;
$\sigma_X$	Desvio padrão da variável $X$ ;
$\sigma_Y$	Desvio padrão da variável $Y$ ;
$\bar{x}$	Média das observações $X$ ;
$\bar{y}$	Média das observações $Y$ ;
$x_i$	Observação de $X$ ;
$y_i$	Observação de $Y$ ;
$n$	Número de observações da amostra;
$R^2$	Coeficiente de determinação
$NS$	Nash-Sutcliffe;
$\overline{P_0}$	Média das chuvas observadas;
$P_m^t$	Chuva obtida pela simulação no tempo $t$ ;
$P_0^t$	Chuva observada no tempo $t$ ;
$RMSE$	Erro quadrático médio;
$X_{obs,i}$	Chuva observada em $i$ ;
$X_{model,i}$	Chuva simulada em $i$ ;
$X_i$	Valor de um evento na posição $i$ -ésima;



$\bar{X}$	Média da amostra;
$x_{md}$	Mediana da amostra;
$s^2$	Variância da amostra;
$s$	Desvio padrão da amostra;
$g$	Coeficiente de assimetria;
$k$	Coeficiente de excesso de curtose;
$P_{cor}(n)$	Precipitação com <i>bias</i> corrigida para o tempo $n$ ;
$P_{sim}(n)$	Precipitação gerada pelo RCM no tempo $n$ ;
$b$	Valor de redução de <i>bias</i> para cada intervalo de frequência;
$b_1$	Coeficiente angular da reta de regressão linear;
$b_0$	Coeficiente linear da reta de regressão linear;
$\epsilon$	Erros ou resíduos da regressão;
$t$	Estatística da regressão linear ou do teste $t$ de Student;
$t_{1-\alpha/2,v}$	Valor tabelado da distribuição $t$ de Student (tabelado);
$v$	Graus de liberdade;
$f$	Fator de alisamento;
$d$	Grau do polinômio;
$w$	Peso atribuído a cada ponto (LOWESS);
$x$	Distância de um dado amostral ao ponto de interesse (LOWESS);
$X_k$	RAPS no limite $k$ ;
$Y(t)$	Valor da variável no instante $t$ ,
$\bar{Y}$	Média dos valores da amostra;
$S_Y$	Desvio padrão da amostra;
$k$	Contador limite da soma atual;
$E(X)$	Média da função $X$ ;
$VAR(X)$	Variância da função $X$ ;
$\alpha$	Grau de significância;

$n_X$	Número de dados da amostra $X$ ;
$n_Y$	Número de dados da amostra $Y$ ;
$F$	Estatística do teste F de Snedecor;
$F_{n_{x-1}, n_{y-1}}$	Estatística do teste F de Snedecor;
$S_X^2$	Variância da amostra $X$ ;
$S_Y^2$	Variância da amostra $Y$ ;
$\rho_S$	Coeficiente de Spearman;
$Rx_i$	Representa a ordem do elemento $x_i$ na série em ordem natural;
$Ry_i$	Representa a ordem do elemento $x_i$ na série ordenada crescente;
$Z$	Estatística do teste de Mann-Whitney ou Wilcoxon;
$Rx_i$	Ordem crescente dos valores da primeira série;
$n_1$	Número de elementos da primeira subamostra;
$n_2$	Número de elementos da segunda subamostra;
$Z_{crítico}$	Valor crítico da estatística de Mann Whitney (tabelado);
$R_i$	Observação anterior do teste de Mann Kendall;
$R_j$	Observação posterior do teste de Mann Kendall;
$i$	Posição de $R_i$ no tempo anterior;
$j$	Posição de $R_j$ no tempo posterior;
$z_{1j}$	Posição de $z_{1j}$ no tempo anterior;
$z_{kj}$	Posição de $z_{kj}$ no tempo posterior;
$H_0$	Observações são independentes e identicamente distribuídas;
$H_1$	Observações possuem tendência no tempo;
$S_{MK}$	Teste de Mann-Kendall (calculado);
$MK$	Estatística do teste de Mann-Kendall;
$S_{MKS}$	Teste de Mann-Kendall Sazonal (calculado);
$T_j$	Fator inicialmente estimado para cada mês;

<i>MKS</i>	Estatística do teste de Mann-Kendall Sazonal;
<i>U</i>	Referente ao teste de Mann Whitney;
<i>Z<sub>crit</sub></i>	Valor crítico da estatística de Mann Kendall Sazonal (tabelado);
<i>p-value</i>	Valor correspondente à estatística dos testes MK e/ou MKS;

## INTRODUÇÃO

O estudo de mudanças climáticas em séries temporais hidrológicas é de grande importância científica e prática para a gestão das águas. Em geral, os sistemas de recursos hídricos são projetados a partir da suposição de que a sequência de dados hidrológicos, de vazão ou de precipitação, seja estatisticamente estacionária (ALEXANDRE *et al.*, 2010).

Também o gerenciamento operacional dos recursos hídricos é previsto assumindo a estacionariedade hidrológica. Segundo MATALAS (1997), os planejadores estão incertos de como o aquecimento global pode ser traduzido em uma não-estacionariedade hidrológica e como esta não-estacionariedade poderia ser incorporada na gestão das águas.

Dentro do contexto de alterações climáticas em séries históricas, não se pode afirmar ao certo se as alterações nos dados hidrológicos se devem às mudanças climáticas antrópicas (e.g. modificações do uso do solo ou emissão de gases de efeito estufa) ou à variabilidade climática natural, resultante de ciclos plurianuais ou mesmo seculares no clima do planeta (TUCCI, 2002).

A aplicação de métodos probabilísticos, na presença de uma série histórica considerável, ou seja, extensa e com um mínimo de falhas ou dados incorretos, permite detectar mudanças sejam estas cíclicas ou de tendência, embora geralmente não distinga entre efeitos antrópicos ou naturais. Na aplicação de modelos probabilísticos, quanto maior a série, maior o nível de confiabilidade do modelo, devido à presença do erro amostral.

Segundo ALEXANDRE *et al.* (2010), existem diversos testes amplamente utilizados para detecção de tendências, visando também identificar eventuais mudanças em séries hidrológicas temporais. O mais recomendado na literatura é o teste de Mann Kendall; porém há outros como o teste do coeficiente de Spearman e do coeficiente de Regressão Linear.

A Regressão Linear é eficiente para detectar tendências seculares nas séries de precipitações. Nas regressões, além da linear também podem ser aplicadas a regressão LOWESS (*Locally Weighted Scatterplot Smoothing*), o método RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sums*) para visualização de

alterações na média e também as funções suavizadoras com média e mediana móveis.

Aplicaram-se métodos estatísticos com as séries de precipitações mensais observadas e geradas por modelos climáticos regionais (RCM). A intenção é verificar se os RCM conseguem reproduzir o período histórico, corrigir o *bias* se necessário e analisar o comportamento futuro das precipitações até o ano 2100. Muitos modelos climáticos regionais (RCM) estão disponíveis na literatura corrente e fornecem cenários de precipitações futuras. Os cenários utilizados neste estudo são gerados pelos modelos ETA, PROMES e RCA1, disponíveis para *download* no site do Projeto CLARIS LPB (MINE *et al.*, 2009).

Os cenários de precipitações gerados por esses modelos foram comparados com a série histórica para verificar a sua consistência, para enfim analisar as tendências de chuvas na região. A estação Curitiba, código ANA 02549006, foi escolhida por ser representativa ou estação chave da região sul do Brasil, por sua localização e longo período de observações, portanto ideal para se trabalhar com mudanças climáticas. Sendo assim, foi possível analisar ao menos qualitativamente como se distribuem as chuvas na capital paranaense para o futuro, possibilitando a tomada de medidas preventivas em diversos usos dos recursos hídricos na região.

## OBJETIVOS

### Objetivo Geral

Analisar tendências futuras da precipitação em Curitiba usando cenários gerados por Modelos Climáticos Regionais (RCM).

### Objetivos Específicos

Identificar tendências no “período histórico” (1889-2012); verificar o potencial dos RCM em reproduzir este período; realizar a correção do *bias* dos cenários dos RCM se for necessário; identificar tendências nas precipitações num período futuro.

## HIPÓTESE

Utilizando cenários de precipitações gerados por RCM é possível prever como será o comportamento pluviométrico em Curitiba para um horizonte de 100 anos que possibilite tomar medidas preventivas.

## ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: introdução e nesta página os objetivos geral e específico, bem como a hipótese do trabalho e organização. O item 1 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o panorama mundial das alterações climáticas nos recursos hídricos, os estudos realizados em vários locais do planeta e também uma breve descrição das chuvas e dos modelos hidrológicos que geraram os cenários de precipitação.

O item 2 trata dos métodos utilizados para análise dos dados e identificação de tendências. O item 3 compreende a descrição da área de estudo. Os itens 4 e 5 apresentam a análise dos registros históricos e dos cenários de precipitação, bem como a aplicação dos métodos descritos no item 3. Por fim, é apresentada a conclusão deste trabalho e as recomendações para os próximos estudos.

## 1. REVISÃO DE LITERATURA

### 1.1. Mudanças climáticas nos Recursos Hídricos

Durante muitos anos foram realizados estudos para identificação de tendências e alterações climáticas em séries hidrológicas em determinados países do mundo. No contexto hidrológico, percebe-se que o clima está mudando, porém não há conclusões bem fundamentadas de quanto e como está mudando. Existem hipóteses em relação a tais evidências, sendo algumas delas afirmando que o homem é um dos grandes responsáveis pelas alterações climáticas. Outras premissas afirmam que o clima está sendo alterado naturalmente, como já foi em tempos remotos.

Nesse contexto, TUCCI (2002) defende, assim como outros pesquisadores, que a variabilidade climática não está relacionada apenas às alterações oriundas das ações antrópicas. Desta forma, significa afirmar que o clima mundial também está se alterando devido aos processos naturais do planeta e do sistema solar.

TUCCI (2002) afirma que o clima é um condicionante fundamental para o desenvolvimento das populações em diferentes partes do planeta. Portanto, mesmo considerando o avanço tecnológico no último século, a variabilidade climática pode, ainda, impactar significativamente o desenvolvimento dos países e comprometer a sustentabilidade das populações.

Em SALAS *et al.* (2012), os autores citam exemplos de como é fácil perceber que o homem chegou às terras de clima árido e semiárido. Alterações devido à derrubada de florestas em grande escala e a crescente urbanização nas bacias hidrográficas são alguns dos exemplos decorrentes desta chegada. A substituição das florestas pela agricultura ocorreu com o intuito de suprir a demanda crescente da população que se encontra próxima à água. Tais mudanças são vistas como oriundas de ações antropogênicas. Também a emissão crescente de gases de efeito estufa, como consequência do uso cada vez mais intenso da energia é considerada como ação antrópica.

No entanto, MOLION (2008) conclui que o aquecimento de  $0,7^{\circ}\text{C}$  nos últimos anos pode estar associado à variabilidade natural do clima, (e.g. variações na atividade solar e na composição atmosférica). Sendo assim, tal aumento não está relacionado apenas com as ações antropogênicas. MOLION (2008) cita também que nos últimos anos aumentou significativamente a emissão de  $\text{CO}_2$  na atmosfera.

Tanto a evolução tecnológica e a variabilidade climática têm ocorrido em vários locais do mundo, dos países subdesenvolvidos aos que estão no topo do desenvolvimento. Por isso, torna-se fundamental saber como proceder quanto às variações que vem ocorrendo na crosta terrestre e também entender o funcionamento destas. Baseados nos fatores responsáveis pelas alterações climáticas torna-se possível realizar estudos de ações preventivas e analisar os impactos causados nos recursos hídricos.

Inúmeros são os elementos responsáveis pelas alterações climáticas e muitas são as formas como estas se manifestam na Terra. Este trabalho tem como enfoque principal a análise do comportamento das chuvas no passado e no futuro, em Curitiba, Brasil. Torna-se possível assim, realizar projeções quanto ao comportamento das precipitações, com o intuito de melhorar o gerenciamento e o planejamento dos recursos hídricos.

Conforme foi demonstrado nos estudos de CISLAGHI *et al.* (2005), desde o século XVIII vem se observando as séries diárias de precipitação na Itália. Foi constatado que as chuvas tiveram um aumento em sua intensidade na porção norte do país após a segunda metade do século XX. Ao sul, é percebida uma tendência negativa tanto no início quanto no final do mesmo período. O sul italiano é menos industrializado que o norte, reforçando a hipótese de que a industrialização pode estar impactando no regime de chuvas na região.

Nos estudos de COSCARELLI e CALOIERO (2012), observa-se que altas taxas percentuais de precipitação podem auxiliar significativamente no aumento dos riscos de enchentes e de instabilidade dos solos. Sendo assim, existem padrões temporais e espaciais na concentração de precipitação mensal e diária no sul da Itália, na Calábria. No entanto, não é observada a



distribuição das chuvas quanto ao norte e sul do país. O resultado da análise mostra que as precipitações têm uma distribuição desigual entre o leste e oeste, apresentando a porção ocidental como a mais chuvosa.

Seguindo com a distribuição das precipitações, uma abordagem sazonal é realizada de acordo com BARROS *et al.* (2000). Os mesmos afirmam que principalmente no Brasil, ocorrem chuvas mais abundantes no verão na maior parte do território brasileiro. Mas em AZEVEDO (1974), é proposta uma observação regional das chuvas, constatando que o sul tem ocorrência, em termos médios de precipitações anuais mais intensas que no sudeste. É observado também que, para o estado do Paraná, junho, julho e agosto são os meses mais secos e que o período de dezembro a fevereiro consiste nos meses mais chuvosos. Nos períodos em que ocorre o evento *El-Niño/Southern-Oscillation* (ENSO), os invernos no estado do Paraná são mais chuvosos e ocorrem as cheias catastróficas.

Sendo assim, a variabilidade da precipitação mensal e anual foi estudada por AZEVEDO *et al.* (2006) na bacia do rio Iguaçu, Paraná. Analisaram a chuva para períodos com evento ENSO. Concluíram que a variação pluvial está associada fortemente a este fenômeno, pois a distribuição de probabilidades da variável aleatória precipitação torna-se condicionada a ocorrência de ENSO. No entanto, existe variabilidade também em anos em que não ocorre o ENSO, porém menos significativa. Constata-se então que nem sempre a variabilidade climática está associada a fenômenos como o ENSO.

Porém os fenômenos relacionados ao ENSO não podem ser limitados apenas aos estudos que ocorreram numa determinada região. Por isso, em FU *et al.* (2013) foi realizado um trabalho de identificação de tendências e variações interanuais e interdecadais. Foram utilizados dados de chuva oriundos da *China Meteorology Administration* (CMA), durante o período observado para muitas estações chinesas. Os resultados indicaram que existem variações nos índices de precipitação. Tais alterações existem e não estão limitadas aos fenômenos do ENSO, sendo relacionadas ao clima das monções, circulações dos ventos e ao aquecimento global.

Eventos de baixa frequência como ENSO, entre outros modulam o clima global em escalas interanuais e interdecadais. Estes eventos são os principais responsáveis pela não estacionariedade do clima global e da hidrologia (SALAS *et al.*, 2012). Sendo assim, de acordo com COSCARELLI e CALOIERO (2012), conhecer as distribuições temporais das chuvas é um dos aspectos mais importantes para identificar alterações climáticas. Secas e enchentes são fenômenos que devem ser estudados para que sejam tomadas as devidas precauções quanto a estes eventos.

Ainda em COSCARELLI e CALOIERO (2012), foi observado que a intensidade das chuvas aumentou e o número de dias chuvosos reduziu, principalmente na China e América. É esperado que a intensidade dos padrões de precipitação se altere, modificando também eventos como secas e cheias, e ocorrendo mais frequentemente. Em CISLAGHI *et al.* (2005), observa-se que na grande maioria das estações no território italiano houve um acréscimo na intensidade da precipitação e uma redução do período chuvoso. Para tal constatação, foram analisadas cinco séries hidrológicas na região norte do país.

A Ásia tem presenciado eventos em 2010 devido aos acréscimos significativos nas chuvas, conforme mostram LI *et al.* (2011). Ocorreram secas no sudoeste chinês e enchentes no Paquistão, Índia e muitas províncias da China. A precipitação é uma valiosa variável para diagnosticar alterações climáticas, bem como revelar a resposta ambiental em escala regional. Estas mudanças afetam diretamente e/ou indiretamente sócio economicamente a região asiática.

Com o objetivo de estudar e avaliar as alterações climáticas que estão ocorrendo na Terra foi fundado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Fornecer informações técnico-científicas e socioeconômicas importantes para o entendimento das alterações no clima é uma de suas principais funções. Seu principal objetivo é estimular socioeconomicamente a população em reduzir a queima de combustíveis fósseis. Para isso, baseia-se na formulação de

estratégias de resposta perante a adaptação e mitigação às mudanças climáticas (ROCHA, 2014).

Como resultado dos estudos realizados nos últimos trinta anos por HOUGHTON *et al.* (1995), citado em LIANG *et al.* (2011), mostrou-se que certas alterações no clima já afetaram algumas variáveis do ciclo hidrológico. A redistribuição das chuvas, acúmulo e derretimento da neve, evapotranspiração e redução dos níveis de água, são alguns dos eventos percebidos devido às mudanças no clima.

MARENGO (2001) mostrou que além da maior frequência e intensidade de eventos climáticos extremos e do aquecimento global, foram observadas alterações nos regimes de chuva e perturbações nas correntes marinhas. De acordo com estudos do IPCC (2013) as alterações climáticas podem vir a afetar negativamente a disponibilidade dos recursos hídricos e, conseqüentemente, o suprimento de água potável, a geração de energia e a navegação fluvial.

Uma alteração observada numa determinada localidade do planeta pode afetar direta e/ou indiretamente outra região do mesmo. Isso pode ocorrer devido à dinâmica dos sistemas. Em um sistema dinâmico (breve definição apresentada no próximo subitem) uma tendência de acréscimo nas chuvas pode representar uma alteração em outra localidade, devido ao movimento das correntes de ar, por exemplo. Outro exemplo são as ondas de calor e frio que podem gerar alterações climáticas e conseqüentemente, mudanças no ciclo hidrológico.

Devido a estes fatores, a crescente importância do conhecimento destas mudanças nos processos hidrológicos tem um significado desafiador para a pesquisa hidrológica e para o gerenciamento dos recursos hídricos. Trabalhos contínuos para: desenvolver técnicas de geração estocástica de séries hidrológicas não estacionárias; aumentar o conhecimento de como ocorrem os processos hidrológicos e como se alteram ao longo do tempo; e quantificar incertezas em como estimar parâmetros para a modelagem, consiste em alguns dos desafios da hidrologia (PEEL e BLOSCHL, 2011).

Contudo, observa-se um comportamento diferente do clima no planeta quando comparado com alguns anos. De um modo geral, a intensidade das chuvas está aumentando enquanto que a frequência com que estes fenômenos ocorrem está reduzindo, alterando também padrões climatológicos. O processo de urbanização auxilia também na transformação do ciclo hidrológico, desde o desmatamento até a impermeabilização, alterando o ciclo da água.

E diversos estudos vêm sendo realizados em todo o planeta com o intuito de analisar estas variações naturais e/ou antropogênicas. A chuva se torna uma variável aleatória interessante para os estudos. Modelar seu comportamento se torna ainda mais difícil, devido à complexidade dos fenômenos que ocorrem na Terra. Assim como se deve tomar cuidado ao utilizar simulações obtidas pelos modelos climáticos (e.g. temperatura e precipitação) para estudos hidrológicos, devido aos erros inerentes ao processo de modelagem.

Neste trabalho, foram utilizados os cenários de precipitações gerados por simulações com o intuito de identificar tendências nas chuvas em Curitiba. Nos próximos subitens são abordadas breves descrições sobre alguns conceitos e sua importância nos estudos das séries hidrológicas e das simulações obtidas pelos modelos.

## 1.2. Sistemas Dinâmicos

Os sistemas dinâmicos consistem em um conjunto de estados relacionados ao tempo e espaço através de transformações lineares ou não lineares que ocorrem em um componente aleatório. Estes compreendem algumas questões importantes como a estabilidade, previsibilidade e a aleatoriedade. Um modelo dinâmico normalmente apresenta três componentes: um determinístico periódico, um determinístico não periódico e outro aleatório.

Em outras palavras, os sistemas dinâmicos consistem em uma abordagem para a compreensão do comportamento de sistemas complexos ao longo do tempo. A teoria moderna dos sistemas dinâmicos, primeiramente

originada no final do século XIX, está fundamentada em questões preocupando-se com a estabilidade e evolução do sistema solar (BRIN e STUCK, 2002).

Um sistema dinâmico consiste em uma fase ou estado do espaço e em uma família de transformações, onde no tempo  $t$  estas podem ser ou discretas, ou contínuas. Em outras palavras um sistema dinâmico pode ser entendido como uma descrição da evolução do estado de um sistema no tempo  $t$  (KLAGES, 2008).

Utiliza-se o termo sistema dinâmico para referir-se ao tempo discreto ou contínuo destes sistemas. A maioria dos conceitos e resultados em sistemas dinâmicos possui versões tanto em tempo discreto, quanto em tempo contínuo. A versão de tempo contínuo muitas vezes pode ser deduzida a partir do tempo discreto, onde os resultados são geralmente mais fáceis de formular e provar (BRIN e STUCK, 2002).

Os sistemas dinâmicos podem ser ditos complexos, quando suas propriedades não são consequências naturais dos elementos que os constituem vistos de forma isolada e sim compostos de vários sistemas que tem como a função, interagir e gerar outros sistemas dinâmicos. Um sistema dinâmico é originado por meio de processos estocásticos.

### 1.3. Processos Estocásticos

As chuvas geralmente apresentam variabilidade temporal. A sequência temporal das chuvas em um dado local pode ser interpretada como uma realização particular de um processo estocástico. Um processo estocástico pode ser definido como uma função  $x = x(z, t)$  onde  $z$  é o resultado de um experimento aleatório e  $t$  é uma variável real representando geralmente o tempo (PAPOULIS e PILLAI, 2002). Desta forma, para um dado valor de  $z = z_0$ , ou seja, uma realização particular de um experimento aleatório resulta  $x = x(t)$ , uma série temporal (FILL *et al.*, 2012).

De forma simplificada, é possível afirmar que os processos estocásticos são aleatórios e que dependem do tempo. Sendo assim, qualquer tipo de evolução temporal que seja analisável em termos de probabilidade podem ser chamada de processo estocástico (KAC e LOGAN, 1976; NELSON, 1985).

Um processo estocástico pode ter domínio contínuo ou discreto. Um processo estocástico é discreto, quando possui um conjunto de variáveis aleatórias indexadas no tempo e contínuo quando as variáveis aleatórias são medidas no intervalo de tempo contínuo.

Além dos processos estocásticos, as séries hidrológicas possuem propriedades estatísticas tais como a homocedasticidade, ergodicidade e estacionariedade. Mais conceitos sobre elas serão abordados nos próximos subitens.

#### 1.4. Homocedasticidade

Consiste em um fenômeno estatístico que ocorre quando o modelo de hipótese matemático apresenta variâncias para  $x$  e  $y$  iguais para todas as observações. Esta hipótese do Modelo Clássico de Regressão Linear pressupõe que a variância de cada termo de perturbação, condicional aos valores escolhidos das variáveis explicativas, é algum número constante igual à variância. Em outras palavras, a homocedasticidade apresenta-se como uma fraca dispersão dos dados em torno de uma reta (CULLOCH e HUSTON, 1985).

A homocedasticidade consiste na variância constante do termo aleatório e ocorre pela observância do postulado, ou seja, os dados regredidos encontram-se mais homoganeamente e mais concentrados (menos dispersos) em torno da reta de regressão do modelo. Sua detecção pode ser realizada por meio do Teste de White (teste de resíduos) (CULLOCH e HUSTON, 1985).

### 1.5. Ergodicidade

Ergodicidade é o estudo das propriedades estatísticas de sistemas dinâmicos em relação a uma medida no espaço subjacente do sistema dinâmico. A hipótese ergódica, afirma que assintoticamente, a média de tempo de uma observação é igual à média do espaço amostral. A configuração adequada para a teoria ergódica é um sistema dinâmico em uma medida no espaço (BRIN e STUCK, 2002).

A ergodicidade ocorre quando os momentos intraeventos coincidem com os momentos temporais  $E_z(X^n(z, t_0)) = E_b(X^n(z_0, t))$ . Em matemática, a teoria ergódica é um ramo que trabalha sobre sistemas dinâmicos que satisfazem uma versão desta hipótese, formulada de acordo com a linguagem da teoria da medida (BRIN e STUCK, 2002).

### 1.6. Estacionariedade

A estacionariedade de uma série temporal ocorre quando a série se desenvolve no tempo aleatoriamente em torno de uma média constante, refletindo um estado de equilíbrio estável. A detecção de não-estacionariedade nas séries hidrológicas pode indicar a presença de tendências. A estacionariedade é definida também por  $f(x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n)) = f(x(t_1 + \tau), x(t_2 + \tau), \dots, x(t_n + \tau))$ . A estacionariedade de uma série pode ser estrita (fracamente estacionária) ou aproximada (fortemente estacionária).

A consideração da estacionariedade nas séries históricas é muito peculiar, pois depende do comportamento da série em cada situação. Para a modelagem hidrológica, considera-se que as séries são estacionárias ou ciclicamente estacionárias, apesar de existirem evidências heurísticas em contrário em muitos casos. Hidrólogos e especialistas em gerenciamento dos recursos hídricos têm concebido que a ideia de que esta não estacionariedade é oriunda de inúmeros fatores, naturais ou antrópicos.

A primeira hipótese é de que a intervenção humana na superfície da terra é responsável por alterações nas relações entre precipitação e vazão em várias escalas. A segunda é de que a ocorrência de fenômenos naturais tais como erupções vulcânicas, incêndios nas florestas e atividade solar, podem ocasionar essas alterações (SALAS *et al.*, 2012).

A terceira é de que a baixa frequência da interação oceano-atmosfera tem uma importância considerável quanto aos efeitos de variação nos fenômenos hidrológicos, como escoamento anual, vazões de pico e dissipação. E finalmente, o quarto é de que o aquecimento global pode ser responsável por realizar alterações nos processos oceânicos e atmosféricos, afetando assim o ciclo hidrológico, nas várias escalas temporais e espaciais (SALAS *et al.*, 2012).

Sendo assim, um estudo realizado por BATISTA *et al.* (2009), teve como objetivo analisar a estacionariedade dos registros de chuva e vazão nas regiões sul e sudeste do Brasil. Para isso, foram utilizados os seguintes métodos: (1) análise de tendência linear nas séries históricas; (2) testes estatísticos; (3) relação entre escoamento e precipitação; (4) curva acumulativa das vazões médias anuais em função do tempo. Utilizando estes métodos foi possível concluir que tanto as séries de chuva quanto as de vazões na sua maioria não são estacionárias no sul do Brasil (BATISTA *et al.*, 2009).

Devido à constatação da não estacionariedade em diversas regiões do mundo, diversos estudos vêm sendo realizados nesta área. O estudo de mudanças climáticas em séries hidrológicas é de grande importância científica e prática para a gestão das águas. Em geral, os sistemas de recursos hídricos são projetados a partir da suposição de que as séries hidrológicas, de vazão ou de precipitação, sejam estatisticamente estacionárias. Em outras palavras supõe-se que as características estatísticas essenciais aos processos hidrológicos, tais como suas medidas de posição e variabilidade, permanecem constantes ao longo do tempo (ALEXANDRE *et al.*, 2010).

Sendo assim, para calibrar ou verificar um modelo, segundo CORDERY *et al.* (2006) uma premissa fundamental é a consideração de que as séries sejam estacionárias. Deve-se ter um cuidado quanto à consideração de



estacionariedade nos modelos porque o objetivo destes é a representação das condições naturais em simulações. Subestimar um processo natural numa simulação pode acarretar em resultados não confiáveis, inviabilizando o modelo.

Modelos hidrológicos utilizados em pesquisas e comunidades de gerenciamento dos recursos hídricos, frequentemente assumem a condição de estacionariedade. As análises estatísticas hidrológicas normalmente assumem que os dados podem ser modelados por uma simples função de distribuição de probabilidades com parâmetros temporais fixos, como média, variância e assimetria (FILL, 2011; PEEL e BLOSCHL, 2011)

## 1.7. Modelos

Os parágrafos anteriores forneceram uma base para os estudos, utilizando breves citações de como está o panorama mundial. Foram apresentados conceitos físicos importantes (estacionariedade, ergodicidade, homocedasticidade) a serem considerados em uma simulação ou em um estudo hidrológico.

Neste item é realizada uma breve apresentação dos modelos que geraram os cenários de precipitação utilizados neste trabalho. Finalmente, são apresentadas as formas de precipitação, para enfim dar continuidade à análise dos dados, que estão mais bem explicados nos parágrafos seguintes desta dissertação.

### 1.7.1. Modelos Hidrológicos

Os modelos hidrológicos consistem em algoritmos matemáticos para simular o comportamento das variáveis hidrológicas no tempo e espaço. Através dos modelos é possível realizar estudos de análise da chuva, por exemplo. A aplicabilidade dos modelos varia desde o preenchimento de falhas em registros históricos até a simulação de eventos para períodos futuros.

Os modelos hidrológicos que sempre são uma simplificação da realidade apresentam várias características que definem a sua relação com o sistema real que pretendem representar. Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que ocorrem nesta.

O funcionamento dos modelos ocorre através da aplicação de técnicas alternativas, como a determinação da sensibilidade de cada método e a marcação no tempo e espaço. Para que um modelo seja eficiente, é necessário realizar um estudo robusto para que sejam obtidas as condições de contorno, equações e parâmetros locais, como base de alimentação de dados.

Em geral é necessário possuir registros históricos para verificar o seu potencial em reproduzir estes dados neste mesmo período. Segundo PEEL e BLOSCHL (2011), somente após uma sequência de estudos e testes de validação de modelos é possível analisar as mais complexas projeções das simulações.

Os modelos climáticos calculam o estado do tempo em grelhas com espaçamentos de alguns graus de latitude e longitude, ou algumas centenas de quilômetros. Estes modelos numéricos, dentre outras utilidades, são extremamente úteis na elaboração da previsão do tempo, principalmente em regiões montanhosas onde, devido aos efeitos da topografia e condições meteorológicas, exibem grande variabilidade espacial (DERECZYNSKI *et al.*, 2010).

Classificam-se os modelos em diferentes aspectos, ou seja, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), com as relações entre essas variáveis (empíricas ou conceituais) além de outras classificações (STEYAERT e GOODCHILD, 1993).

Um modelo estocástico é quando ao menos uma das variáveis envolvidas possui comportamento aleatório. Caso os conceitos de probabilidade sejam negligenciados durante elaboração de um modelo, este será denominado determinístico. Entretanto, uma variável de entrada pode ser

aleatória, mas o modelo ainda assim é determinístico quando cada valor de entrada produz um único valor de saída (STEYAERT e GOODCHILD, 1993).

Um modelo empírico utiliza relações baseadas em observações. No geral são simples, porém pouco robustos de informações, uma vez que são específicos à região para a qual foi desenvolvido. Uma desvantagem destes modelos é que eles não possibilitam fazer simulações de alterações em condições como chuvas intensas. Os modelos conceituais são baseados em processos e geralmente são mais complexos que os empíricos, uma vez que procuram descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno estudado (STEYAERT e GOODCHILD, 1993).

Os modelos climáticos geram saídas (variáveis) por isso, antes de utilizá-los, recomenda-se que se realize um processo conhecido como calibragem, que corresponde ao ajuste dos parâmetros do modelo aos dados do local. Na calibragem é verificado o potencial do modelo em reproduzir as variáveis climatológicas, tendo uma série histórica considerável para análise dos valores simulados e observados. A verificação (validação) consiste em comparar novamente os resultados das simulações com os registros observados, utilizando parâmetros fixos.

Como objeto de estudo deste trabalho, são utilizadas saídas de alguns modelos climáticos regionais (RCM), originados de modelos climáticos globais (GCM). Os modelos utilizados para simulação das variáveis aleatórias fornecem cenários de precipitação e temperatura, bem como parâmetros que representam o local. Neste trabalho foram utilizadas as saídas (chuvas) do GCM (ECHAM5/*Max Planck Institute Ocean Model*) e o cenário A1B, conforme proposto pelo IPCC (2013).

Desta forma, torna-se importante realizar uma análise das séries de temperatura e precipitação simuladas. Assim é possível analisar como será o comportamento de uma bacia hidrográfica num período futuro. Os valores de chuva e temperatura são obtidos através dos GCM. Por se tratarem de modelos com escala grande, demandam um alto processamento computacional e por esta razão apresentam uma baixa resolução. Com o intuito de aumentar tal resolução, foram criados métodos de *downscaling*, que

são aplicados às saídas dos GCM, gerando assim os RCM. Os RCM são modelos semelhantes aos GCM, porém atuam numa região menor e apresentam resultados com maior resolução (ROCHA, 2014).

Utilizando os RCM, TEUTSCHBEIN e SEIBERT (2012) sugerem classificar os estudos baseados no raio de análise da região. Por exemplo, impactos regionais devem ser estudados num raio de 25 até 50 km. Raios situados entre 100 e 250 km, os estudos já se encontram numa escala global. Um método comum para estimar as séries futuras de precipitação e temperatura em um local de interesse consiste em uma simulação através dos GCM e o posterior refinamento destes resultados através de um RCM.

De acordo com TEUTSCHBEIN e SEIBERT (2012), nos estudos de impactos e alterações climáticas, variáveis em larga escala são fornecidas pelos GCM enquanto que problemas de dimensões regionais são resolvidos com o uso dos RCM. Ocorrem algumas incompatibilidades de escalas nos modelos regionais, principalmente na média e devido à escala pequena. Com isso, modeladores estão encontrando certos erros, *bias*, em suas simulações nos RCM.

Devido às incompatibilidades dos tipos de *bias*, os pesquisadores desenvolveram recentemente aproximações de correções de *bias*, que aproximam os resultados do modelo regional aos valores reais. Um método, destes mencionados, explicado posteriormente, foi aplicado nas simulações que apresentaram *bias* para correção. Na sequência é apresentada uma breve descrição dos modelos cujos cenários de precipitação foram utilizados neste trabalho.

#### 1.7.1.1. Modelo ETA

O modelo regional ETA, segundo BLACK (1994), inicialmente desenvolvido na Universidade de Belgrado, é utilizado operacionalmente para fornecer previsões de tempo de curto prazo (seis em seis horas). Tem uma resolução horizontal de 40 km ou 80 km, com 38 níveis na vertical. O domínio

do modelo cobre grande parte da América do Sul. O topo do modelo está posicionado em 50 hPa. Uma das características deste modelo é a utilização da coordenada vertical ETA, que segundo MESINGER (1984), foi criada para reduzir o erro no cálculo da força do gradiente de pressão. Este erro pode estar presente em modelos que usam coordenadas que consideram a pressão atmosférica e a altura topográfica. As variáveis prognosticadas são temperatura, vento horizontal, umidade específica, pressão à superfície, energia cinética turbulenta e hidrometeoros das nuvens (ROCHA, 2014; DEREZYNSKI *et al.*, 2010).

#### 1.7.1.2. *Modelo PROMES*

O *Prognostic Mesoscale* (PROMES) é um modelo paralelo oceano-atmosfera de alta resolução, desenvolvido como um projeto conjunto por pesquisadores das universidades de Castilla-La Mancha e Politécnica de Madrid. Este modelo atmosférico é de área limitada 3D e utiliza a projeção cônica de Lambert. Esta consiste numa projeção cartográfica em que a superfície da Terra é representada sobre um cone imaginário em contato com a esfera em determinado paralelo, para lidar com as coordenadas horizontal e vertical. O modelo tem uma resolução espacial de aproximadamente 25 km a 50 km e 37 níveis de discretização vertical. As suas variáveis prognósticas são: temperatura potencial, pressão à superfície, componentes horizontais do vento, umidade específica, nuvens e chuva (ROCHA, 2014; BUCHIR, 2013; GARRIDO *et al.*, 2009).

#### 1.7.1.3. *Modelo RCA1*

O *Rosby Centre Regional Atmospheric Climate Model* (RCA1) é um modelo regional baseado no modelo operacional de alta resolução para previsão do clima numa área limitada *High Resolution Limited Area Model* (HIRLAM). Trata-se de um modelo hidrostático com 24 níveis verticais, sendo o mais alto a 10 hPa, embasado em equações primitivas de ponto de grade, do

qual são calculadas as variáveis prognósticas. O RCA1 fornece cenários climáticos regionais com resolução espacial de aproximadamente 44 km, e as suas variáveis prognósticas são: temperatura, umidade específica, vento horizontal, precipitação e pressão à superfície (ROCHA, 2014; BUCHIR, 2013; RUMMUKAINEN *et al.*, 2001).

#### 1.7.2. Correção de *bias*

Em estudos hidrológicos de impactos de mudanças climáticas, saídas de GCM são transferidas para escalas regionais. No entanto, para isso é necessário em algumas vezes realizar a correção de *bias*. Nos estudos de TEUTSCHBEIN e SEIBERT (2012) foram analisadas correções de *bias* em onze séries diferentes de precipitação e temperatura. Os métodos utilizados estão descritos no mesmo artigo. Houve uma melhoria nas séries simuladas utilizando as correções de *bias*, sendo que muitos métodos foram capazes de corrigir os valores médios diários, porém não se mostraram significativos quanto à correção dos desvios-padrão e dos percentis.

Nos estudos de WATANABE *et al.* (2012) são apresentados métodos de correção de *bias* de simulações mensais obtidas por 12 GCM. Foram utilizados: diferença entre os dados observados e os valores simulados no período de validação para (1) temperatura e (2) precipitação; (3) diferença da variação entre as temperaturas corrigidas e não corrigidas; (4) diferença da variação entre os desvios-padrão das temperaturas corrigidas e não corrigidas; (5) diferença da variação entre as chuvas corrigidas e não corrigidas. Além dos cinco métodos propostos anteriormente, foi apresentado um novo método que conserva alterações na média, no desvio padrão e no coeficiente de variação antes e depois da correção de *bias*. Foi constatado que o método teve sucesso tanto nas séries de precipitação, quanto nas de temperatura.

Em SAURRAL (2010) foi apresentado um novo método de correção de *bias*, correção por intervalos de frequência. Tal método consiste em classificar e dividir os registros de chuva em intervalos de classe. Para isto, são calculadas diferenças de *bias* para cada intervalo de classe considerado. O

autor observou que o método teve sucesso na aplicação, aproximando bem os valores gerados pelos RCM aos dados observados. O método foi aplicado às saídas de precipitação (RCM) na bacia do Rio da Prata.

Dados de chuva e temperatura de três RCM (RACMO-HC, RCAO-HC e RCAO-MPI) foram utilizados para estimar as alterações das inundações do rio franco-belga Meuse. As simulações foram obtidas por dois GCM diferentes, sendo um deles o HADM3H, do centro de Hadley (HC) e ECHAM4/OPYC3 do instituto de meteorologia Max-Planck (MPI). Para tal, foi utilizado um método de correção de *bias*, sendo este calculado pelas diferenças entre as médias observadas e simuladas no mesmo período. É demonstrada a correção de *bias* de saída dos RCM (simulações de temperatura e precipitação), assim como as descargas estimadas de inundação (LEANDER *et al.*, 2008).

Basicamente a correção de *bias* deve ser realizada passo a passo tanto na verificação das simulações obtidas pelos RCM quanto na análise de consistência dos dados observados. Diversas técnicas de correção de *bias* foram encontradas na literatura, sendo uma das mais utilizadas, o cálculo das diferenças entre as médias simuladas e observadas no mesmo período, conforme descrito em LEANDER *et al.* (2008).

Antes de utilizar cenários obtidos por simulações é fundamental saber conceitos sobre os modelos e também ter certo conhecimento da utilização dos mesmos em estudos anteriores. Sendo assim, para simular uma variável aleatória é necessário conhecer um pouco sobre ela e como ela se comporta na região em estudo. Para isso, são apresentadas nos subitens abaixo as formas de precipitação.

#### 1.8. Formas de Precipitação

Diversas são as formas de precipitações encontradas na natureza, mas para o Brasil, são consideradas as chuvas como as mais frequentes. As outras formas de ocorrência não são eximidas, porém para efeitos de estudos hidrológicos regionais não foram consideradas neste trabalho. Existem várias

formas de precipitação tais como granizo, neve, entre outras. A análise da chuva é realizada pelas estações pluviométricas, responsáveis por coletar dados de precipitação em intervalos de 24 horas (BUCHIR, 2013).

Em DETZEL (2009) é apresentada uma breve descrição sobre a ocorrência das chuvas. Isso se dá quando a massa de ar é resfriada e a temperatura chega a valores relativamente baixos, sendo assim o vapor d'água se condensa. Nesta massa de ar, é necessário que ocorra a chegada de ar aquecido e com umidades oriundas da evapotranspiração e evaporação. O resfriamento ocorre pela ascensão da massa de ar úmido na atmosfera.

No mesmo estudo, DETZEL (2009), apresenta três classificações diferentes para as chuvas, sendo estas determinadas pela maneira como ocorre a ascensão do ar na atmosfera. Mais detalhes sobre as chuvas podem ser vistas em HENDERSON-SELLERS e ROBINSON (1986). Processos de formação de nuvens, deslocamento das massas de ar e conceitos de instabilidade, pressão e temperatura são encontrados nesta referência.

#### 1.8.1. Precipitações Convectivas

As chuvas convectivas ocorrem mais frequentemente nos períodos quentes do ano, geralmente em pequenas áreas. O processo de formação destas chuvas ocorre quando o ar aquecido da superfície terrestre torna-se menos denso, sendo forçado a subir devido ao empuxo estático. Tal ascensão ocorre na vertical, tornando o seu resfriamento rápido, resultando em chuvas de curta duração e grande intensidade.

As precipitações convectivas mais intensas ocorrem em casos específicos, onde uma massa de ar aquecida fica presa sob uma camada de ar frio. Quando a camada de ar mais pesada tende a descer, esta camada provoca uma ascensão mais brusca da massa de ar antes presa, gerando assim chuvas extremas. Tal configuração citada ocasiona uma condição atmosférica relativamente instável.



### 1.8.2. Precipitações Frontais ou Ciclônicas

Este tipo de chuva ocorre geralmente em regiões de baixa pressão atmosférica, local onde se encontram massas de ar provenientes de diferentes densidades, direções e temperaturas. Quando ocorre o encontro de duas massas de ar de diferentes temperaturas, atribui-se a este o nome de frente (fria ou quente).

A formação de uma frente fria ocorre quando uma massa de ar frio se move em direção à massa de ar quente. Uma frente quente se forma quando o ar quente se move em direção à massa de ar frio.

Quando as frentes são confrontadas, ocorre uma ascensão da massa de ar quente sobre a fria. Tal ascensão ocorre lentamente em direção oblíqua à superfície terrestre, resultando num resfriamento lento e progressivo. Devido a isto, as chuvas possuem duração mais extensa e tem intensidade menor em relação às chuvas convectivas.

Este tipo de precipitação espalha-se em uma área relativamente maior e são mais comuns nas estações mais frias do ano. A formação das chuvas ciclônicas ocorre devido à dinâmica entre estas frentes, sendo que sua intensidade varia de acordo com a taxa de variação de temperatura entre as duas massas de ar.

### 1.8.3. Precipitações Orográficas

As chuvas orográficas ocorrem quando o ar aquecido encontra um obstáculo (escarpas, montanhas ou colinas elevadas), sendo este obrigado a subir, se resfriando. Isto tem como resultado, chuvas fracas e que ocorrem quase nos mesmos locais onde elas se originaram. Elas se diferenciam dos outros tipos de chuva, quanto ao relevo, força do vento e, quando ocorrem em regiões costeiras, do contraste entre as temperaturas da terra e do mar. Estes tipos de chuva não estão diretamente relacionados a épocas do ano.

Foi realizada uma breve descrição das formas de precipitação mais comuns no Brasil. Na sequência, são apresentados métodos de análise dos dados.

### 1.9. Análise dos Dados

A análise dos dados consiste não apenas em identificar se existem falhas ou mudanças nas séries hidrológicas. É também muito útil para a validação de modelos e verificação da consistência dos valores, tanto nos registros históricos, quanto na verificação das simulações por um modelo. Sendo assim, nos próximos subitens que contemplam este trabalho, são apresentados métodos utilizados para analisar os registros e as simulações. Na sequência são apresentados os estudos referentes à análise de tendência no regime de chuvas.

#### 1.9.1. Análise Preliminar

Uma análise preliminar dos registros observados é fundamental para a verificação de sua consistência e, para isto, se torna necessário conhecer um pouco sobre como são realizadas as medições de chuvas. A água proveniente da chuva é coletada pelos postos pluviométricos, que estão instalados sobre todo o território em estudo. Os dados são avaliados por meio de uma proveta graduada, medindo a chuva em décimo de mm. Geralmente estão instalados a uma altura de 1,50 m acima do solo.

Um posto pluviométrico tem como objetivo produzir uma série ininterrupta de precipitação ao longo dos anos. Nos registros realizados por um posto pluviométrico podem ocorrer períodos sem informação ou com falhas das observações decorrentes de problemas com os aparelhos e/ou ausência de operador no posto. Por isso, os dados coletados devem ser submetidos a uma análise preliminar, conhecida como análise de consistência de dados (BUCHIR, 2013).

Entende-se por análise de consistência de dados hidrológicos, como um conjunto de procedimentos aplicados aos dados para verificar se são coerentes e se estão isentos de desvios sistemáticos e erros diversos, isto é, comprovar o grau de homogeneidade das observações disponíveis num posto de medição (COLLISCHONN e TASSI, 2008; PINTO *et al.*, 1976).

A análise exploratória dos dados (EDA), abordada no próximo item consiste num conjunto de técnicas para identificação de mudanças. Após a EDA, são formuladas as hipóteses para enfim, aplicar os testes estatísticos.

### 1.9.2. EDA (*Exploratory Data Analysis*)

Trabalhando com dados hidrológicos, torna-se possível a identificação de tendências ou alterações abruptas nas séries temporais. Prioritariamente, é utilizada uma análise de modo visual com o intuito de facilitar a detecção de tais tendências ou mudanças nos dados das séries. Existem inúmeros métodos para realizar tal análise, mas segundo GRAYSON *et al.* (1996), é imprescindível que se faça uma análise exploratória utilizando gráficos, antes mesmo de serem aplicados outros métodos.

KUNDZEWICZ e ROBSON (2000) apresentam um método muito utilizado para identificar alterações nos dados e tendências. Tal análise consiste na *Exploratory Data Analysis* (EDA) ou análise exploratória dos dados. Ela é realizada através da elaboração de gráficos e outros métodos a fim de entender e representar as informações, sendo um componente essencial antes de se iniciar qualquer análise estatística.

A EDA também é muito útil para obter uma interpretação subjetiva das possíveis alterações nas séries e assim formular hipóteses que podem ser testadas estatisticamente. Em ALEXANDRE *et al.* (2010) são mostrados inúmeros testes que avaliam a significância estatística de uma tendência. Mas a técnica de analisar graficamente os dados das séries hidrológicas é imprescindível antes da aplicação destes testes.

Além de ser uma valiosa ferramenta de interpretação estatística, em KUNDZEWICZ e ROBSON (2000) mostra-se o quanto a técnica EDA é importante no estudo de tendências. As finalidades consistem em identificar eventuais existências de *outliers* ou pontos atípicos, falhas nos registros e alterações nas séries temporais. Constitui um conjunto de técnicas que avalia os dados brutos da série.

Num estudo onde os dados não são estacionários é fundamental que seja realizada a EDA. Sendo assim, diversas metodologias podem ser empregadas na análise, como histogramas e sua relação com a distribuição de probabilidade normal, gráficos temporais e de correlação, testes de normalidade e dependência temporal e funções suavizadoras (ALEXANDRE *et al.*, 2010; KUNDZEWICZ e ROBSON, 2000).

Das técnicas mencionadas anteriormente, as médias e medianas móveis são as mais utilizadas. Para realizar tais cálculos, são consideradas as médias ou medianas das variáveis a serem estudadas sobre períodos iniciando em tempos sucessivos, suavizando os dados desta forma. Recomenda-se utilizar a mediana em detrimento da média, fornecendo resultados mais satisfatórios, ou seja, menos influenciada por *outliers* (ALEXANDRE *et al.*, 2010).

As funções suavizadoras são citadas por ALEMAW e CHAOKA (2002) e ALEXANDRE *et al.* (2010). Uma delas é a técnica *Rescaled Adjusted Partial Sums* (RAPS). Depressões ou elevações pronunciadas podem indicar uma tendência na série hidrológica. A declividade negativa indica períodos onde a média é menor que a média anterior ao ponto de mudança, enquanto que a declividade positiva indica períodos em que a média é maior que a média no ponto de mudança. Segundo os mesmos autores, a escolha desses pontos de mudança no gráfico RAPS deve ser feita mediante a análise do período de maior amplitude entre um “pico” e uma “depressão” ou vice-versa.

A análise exploratória dos dados foi realizada nos estudos de MORAES *et al.* (1997), consistindo na utilização do teste de Mann Kendall (tendências) e o teste de Pettitt (mudanças abruptas nas séries). Em FILL (2011) foi utilizada outra forma de EDA para identificar pontos de possíveis alterações. O método consiste na plotagem dos valores acumulados contra o tempo, verificando

locais de mudança de declividade. As subamostras submetidas aos testes estatísticos são então definidas como os conjuntos anteriores e posteriores a mudança de declividade.

TOZZI (2014) apresenta uma descrição detalhada das várias técnicas de EDA para análise da estacionariedade das séries de vazões anuais médias e máximas. Nesta dissertação, foram aplicadas muitas técnicas de EDA utilizadas em TOZZI (2014) e também em ALEXANDRE (2009). A não estacionariedade das séries pode evidenciar a presença de tendências.

### 1.9.3. Análise de Tendências

Estar a par do conhecimento das tendências das variáveis históricas hidro climatológicas é importante para o gerenciamento dos recursos hídricos. Segundo OGUNTUNDE *et al.* (2011), analisar e detectar mudanças históricas no ciclo hidrológico é importante para a pesquisa de alterações climáticas. Um dos principais elementos deste ciclo é a chuva, portanto deve-se entender seu comportamento. Sendo assim, analisar tendências futuras é importante para a tomada de medidas preventivas tanto no aproveitamento quanto no controle de recursos hídricos.

Sendo assim, dentro do contexto de aquecimento global, é importante ter conhecimento sobre como funcionam os ciclos da água e energia. Para isso é necessário detectar tendências e oscilações nas chuvas para entender o funcionamento do clima. Entretanto, analisar essas tendências e oscilações não é uma tarefa fácil justamente por não ser uniforme. Ela é alterada de local a local e tempos em tempos, principalmente em escalas pequenas (OGUNTUNDE *et al.*, 2011).

Em BACK (2001) é definida a tendência numa série temporal como uma mudança sistemática e contínua em qualquer parâmetro da amostra, excluindo-se mudanças semiperiódicas ou periódicas. Portanto, uma mudança é caracterizada por um suave decréscimo ou acréscimo nos valores no período

de registro. Na sequência, são apresentados alguns estudos realizados para identificação de tendências.

#### 1.9.3.1. *Estudos Realizados*

Inúmeros estudos de identificação de tendências nas chuvas são encontrados na literatura. Estes consistem na aplicação de métodos e testes estatísticos que servem como base para obter algumas respostas do clima frente à variabilidade natural ou variação ocasionada pelo homem. Neste item estão descritos os estudos realizados utilizando testes estatísticos para identificação de tendências.

KUNDZEWICZ e ROBSON (2000) apresentaram uma distinção entre testes de acordo com a sua classificação quanto a mudanças nas séries hidrológicas. Seguindo esta classificação, os testes mais utilizados para a análise de tendências são: Mann Kendall, Mann Kendall Sazonal, o teste do coeficiente de Spearman e os testes de coeficientes de Regressão Linear.

Com a intenção de identificar tendências em séries hidrológicas, COSCARELLI e CALOIERO (2012) aplicaram o teste de Mann Kendall para verificar tendências nas chuvas na Calábria, Itália. Os resultados mostraram um comportamento uniforme das precipitações do oeste italiano durante todo o ano. O mesmo não ocorreu na porção leste, onde a chuva tem uma precipitação desigual, sendo que 1/4 do volume precipitado representou quase 3/4 do total anual precipitado na mesma região. A aplicação do teste de Mann-Kendall mostrou tendência.

Em CISLAGHI *et al.* (2005) foi aplicado o teste de Mann Kendall para verificação de tendência nas séries de chuvas de longo termo na Itália. Em Milão, Genebra e Bologna (norte), a aplicação dos testes para as chuvas anuais revelou a existência de tendência negativa na primeira metade do século XX, sendo que na segunda metade do mesmo século, foi constatada uma tendência positiva. Já em Palermo (sul) foi constatada apenas uma tendência negativa durante todo o século. Na região norte do país constatou-se

um aumento nas chuvas médias, com eventos de curta duração e maior intensidade.

O teste de Mann Kendall é amplamente utilizado na análise de mudanças climáticas, entre os vários métodos estatísticos existentes para análise de tendências de séries pluviais. É um dos métodos mais conhecidos, sendo recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Tem a intenção de avaliar a significância da tendência em séries hidrológicas, simplesmente por ter a vantagem de não necessitar de quaisquer hipóteses de distribuição nos dados amostrais (BACK, 2001; BARROS *et al.*, 2011).

Nos estudos de WANG *et al.* (2008), alterações nas chuvas e no escoamento da bacia do rio Dongjiang, ao sul da China, foram investigadas pelo teste de Mann Kendall e outros métodos, como o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste dos quantis (detecção de mudanças na distribuição de probabilidades). Foi mostrada uma pequena variação nos extremos anuais de chuva em vários índices. Algumas alterações mensais significativas indicam que em relação às alterações climáticas, as variações sazonais nos eventos extremos deveriam ser consideradas.

LIANG *et al.* (2011) avaliaram o comportamento da distribuição temporal e espacial das chuvas no nordeste da China entre 1961-2008. Foi aplicado o teste de Mann Kendall. Os resultados indicaram uma variação significativa da precipitação mensal, sendo o verão representando 65,7% da chuva anual. Foi observada uma tendência negativa na maioria das chuvas anuais e mensais das 98 estações meteorológicas. Saltos foram detectados em ao menos 67% das precipitações anuais e mensais, sendo três deles com períodos de 2,8 anos em média.

Pela proposta de detectar tendências de longo termo nas chuvas do Japão, XU *et al.* (2003) aplicaram os testes Mann Kendall, Mann Whitney e o t de Student (*t-test*) para as chuvas médias no Japão. Os resultados indicaram que independente das variações ocorridas nas chuvas japonesas, as séries não exibiam significativas tendências durante o último século.

Nos registros hidrológicos de chuva e vazão da bacia amazônica, foram detectadas tendências com maior magnitude nos três meses do verão. MARENGO e TOMASELLA (1998) utilizaram os testes de Mann Kendall, regressão linear e t de Student. Foram encontradas tendências fortemente negativas no norte do Peru e no rio São Francisco (Brasil), enquanto tendências positivas foram encontradas no rio Parnaíba. Tendências não significativas foram encontradas em outros locais da região de estudo.

O teste t de Student também foi aplicado por TROGER *et al.* (2001), que estudaram a hipótese de estacionariedade das séries de vazões das usinas hidrelétricas de Sobradinho e Três Marias entre 1931 a 2001. Utilizaram também outros testes estatísticos, como Mann-Whitney, coeficiente de Spearman e F de Snedecor. Os resultados da aplicação dos testes mostraram que as séries de vazões na região de estudo podem ser consideradas como estacionárias.

TROGER e PANTE (2009) estudaram a estacionariedade nas séries de vazões médias anuais de seis estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Tapajós, Brasil. Aplicaram os testes: Mann-Whitney, coeficiente de Spearman, F de Snedecor e t de Student. Os resultados indicaram que a cabeceira do rio Tapajós teve um decréscimo nas vazões médias anuais no período analisado (1976 – 2005). Foi suposto que a redução nas vazões pode ter ocorrido devido à redução na taxa de precipitação anual ou estar relacionada com indícios de tendências no coeficiente de escoamento.

HIRSCH *et al.* (1982) utilizaram o teste de Mann Kendall e do coeficiente de Spearman para detectar tendências nas séries hidrometeorológicas. O teste de Spearman apresentou resultados similares aos do Mann Kendall, quanto à aceitação da hipótese de tendência. Ambos foram aplicados para analisar a tendência das vazões máximas diárias anuais de 20 bacias em Ontário, Canadá. Foi constatada uma tendência decrescente na maioria das bacias. Os autores sugerem que os dois testes sejam aplicados para a análise dos resultados quanto à tendência (YUE *et al.*, 2002).

GROPPO *et al.* (2001) elaboraram um artigo utilizando dados anuais de precipitação num período de meio século, finalizando em 1996. Após a análise,



constatarem como estatisticamente significativo o aumento da chuva neste período. Foram utilizados dois passos: (1) verificação da independência da série temporal através do teste de autocorrelação serial; (2) estudo exploratório: versão sequencial do teste de tendência de Mann Kendall e testes de mudanças bruscas nas médias de Pettitt.

STIPP *et al.* (2013) analisaram a sazonalidade da precipitação na bacia do rio Iguaçu, Brasil. Para tal foram utilizados dados observados de precipitação mensal e cenários gerados por modelos climáticos regionais (RCM). Foi aplicada a análise exploratória dos dados e o teste de Mann Kendall Sazonal, tanto no período histórico quanto no período futuro. Os resultados obtidos mostraram uma maior tendência de precipitação no período histórico para os meses que compreendem o verão e a primavera, nos cenários gerados por modelos e nas observações. Para o período futuro foi constatado que o modelo RCA1 apresentou melhor coerência com o período histórico.

FISCH e FOLHES (2006) utilizaram o Mann Kendall Sazonal com o intuito de verificar a ocorrência de tendências na série de chuvas em Taubaté, São Paulo. Não foram verificadas tendências na média anual precipitada, devido à relativa variabilidade interanual das chuvas. Porém, foi constatado que as séries de chuvas tiveram uma tendência de aumento no mês de novembro. As séries de precipitação tiveram uma tendência de redução no mês de abril. Também constatarem que houve uma diminuição anual dos dias chuvosos. O período chuvoso em Taubaté ocorre em meados de setembro até abril.

LETTENMAIER *et al.* (1994) aplicaram o teste de Mann Kendall Sazonal para 1036 séries hidroclimatológicas nos Estados Unidos, no período de 1948 a 1988. Foram analisadas as séries mensais e anuais de chuva, vazão e temperatura. Ao norte e oeste dos Estados Unidos foi identificada tendência de aumento da temperatura anual, enquanto que nas estações ao sul e leste houve um decréscimo na temperatura anual. Em 25% das estações analisadas, houve um acréscimo nas chuvas, no período entre setembro a dezembro, principalmente na região central do país. Também foi detectado um acréscimo nas vazões entre novembro e abril, em metade das estações estudadas.

ROMANO *et al.* (2011) utilizaram o teste de Mann Kendall para verificar se há tendências nas séries anuais de precipitação e vazões na bacia do rio Tiber, Itália. A chuva anual teve um decréscimo considerável sobre toda a bacia, principalmente no inverno. Houve também um decréscimo nas vazões observadas no mesmo período. Concluíram que em escala anual o decréscimo da precipitação está relacionado com o decréscimo das vazões.

MESCHIATTI *et al.* (2012) identificaram a ocorrência de tendências em séries temporais relativas aos índices anuais de precipitação, vazão e temperatura média, registradas em doze localidades no estado de São Paulo. Para cada série hidrológica, foram realizadas análises de regressão linear e foram aplicados os testes Mann Kendall e Pettitt, com o objetivo de identificar tendências e/ou mudanças abruptas na série histórica. Como resultado, foi confirmado que em cinco rios analisados ocorreram tendências positivas e para apenas um foi encontrada tendência negativa. Somente uma localidade apresentou aumento na precipitação, enquanto cinco registraram aumento na temperatura média.

A análise espacial e temporal das tendências de chuvas de séries anuais e sazonais foi realizada por SAYEMUZZAMAN e JHA (2014), utilizando 249 estações pluviométricas na Carolina do Norte, EUA nos últimos 50 anos. O teste de Mann Kendall foi aplicado para identificar tendências. Os resultados mostraram uma tendência crescente no inverno e uma decrescente no outono, em todo o estado. Analisando o Estado todo em conjunto, índices concluem que a variabilidade da tendência das precipitações pode ser explicada pelas oscilações do clima que ocorrem na Carolina do Norte.

ALEXANDRE *et al.* (2010) realizaram estudos para verificação de tendências no regime de chuvas na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Para isto, utilizaram o teste de Mann Kendall e também a geração de gráficos temporais, de média e mediana móveis de 10 anos, regressões lineares e do tipo LOWESS (*Locally Weighted Scatterplot Smoothing*) e gráficos RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sums*). Foi identificada uma possível tendência de aumento de precipitação no período de abril a setembro (período mais seco) e

uma redução na precipitação entre os meses de outubro a março (período mais chuvoso).

Utilizando o método RAPS, ALEMAW e CHAOKA (2002) analisaram possíveis tendências nas vazões anuais de 502 rios da África do Sul. Um experimento simulado da técnica conduziu a amostra de como a RAPS revela e mostra os resultados para identificar tendências em séries hidrológicas. A impressão dos dados em RAPS oferece uma razoável visualização das técnicas aparentes, que podem ser omitidas nas impressões de gráficos padrões utilizando apenas as séries de vazões. As tendências mostraram ser lineares e em declínio. De todas as séries de vazões registradas, 137 julgaram-se com consideráveis tendências negativas, 96 com tendência positiva e o restante pareceu não apresentar tendências.

TOZZI (2014) analisou a estacionariedade das séries de vazões médias, máximas e mínimas, anuais e sazonais no rio Iguaçu, Brasil. Foram aplicados os métodos RAPS, os testes estatísticos t de Student, F de Snedecor, Mann Whitney e o teste do coeficiente rho de Spearman. Conclui-se dos estudos que houve uma aparente alteração na média quanto à análise das vazões médias e máximas, apontando uma possível tendência ou não estacionariedade da série. Quanto a análise das vazões mínimas, o resultado não foi evidente.

Séries de vazões anuais e níveis máximos dos rios foram analisados por BORMANN *et al.* (2011) com o intuito de analisar as tendências. Eles utilizaram regressão linear em 78 rios espalhados pela Alemanha. No mesmo país, PINTER *et al.* (2006) utilizaram regressão linear nas séries de vazões e precipitações do rio Reno. Em ambos os trabalhos foram detectadas tendências positivas nas vazões, porém não ocorreram tendências nas precipitações.

LINDSTRÖM e BERGSTRÖM (2004) analisaram 61 séries de vazão de rios situados na Suécia entre 1901 a 2002. Foram estudadas as séries anuais de vazão e os picos anuais e sazonais de inundações. Todas as séries foram submetidas a regressões lineares, sendo que os registros de diversos postos foram sintetizados numa série média. Não foi detectada tendência significativa no período completo, apenas quando os autores dividiram as séries em

subperíodos. Sendo assim, a escolha dos períodos é determinante para os resultados.

SHARMA *et al.* (2000) também utilizaram regressões na bacia do rio Kosi, Himalaia. Eles utilizaram séries mensais e anuais de precipitação, temperatura e vazão. As séries mensais foram divididas em períodos sazonais antes da aplicação dos testes. Tendências positivas foram encontradas para as séries de temperaturas e precipitações, enquanto que as vazões apresentaram tendências negativas. Tal fato levou os autores a suspeitar que estejam ocorrendo mudanças no regime de neves no local.

#### 1.10. Resumo do Capítulo

Nos primeiros subitens foi apresentada uma breve descrição do cenário atual, explicando um pouco do que está ocorrendo no mundo em função das mudanças climáticas. Explicaram-se conceitos importantes (ergodicidade, homocedasticidade, processos estocásticos e estacionariedade) para a análise de séries temporais, modelagem, entre outros.

As séries em estudo não são estacionárias, porém nas simulações elas são consideradas como estacionárias. No subitem "Modelos", foram apresentados os modelos cujas saídas são utilizadas neste estudo, bem como os tipos de precipitações.

No subitem "Análise dos Dados" foram apresentados os estudos realizados para identificação de tendências em séries hidrológicas, apresentando alguns resultados obtidos por diversos autores. Métodos de análise dos dados, testes estatísticos, bem como a EDA foram, também, apresentados neste subitem.

Nesta dissertação são utilizados para verificação de tendência nas séries hidrológicas os testes de Mann Kendall e Mann Kendall Sazonal. Foram analisadas as tendências utilizando os métodos: média e mediana móvel de 10 anos, gráficos RAPS, regressões lineares e regressões do tipo LOWESS e correção de *bias*.

Foram apresentados em linhas gerais os RCM (PROMES, ETA e RCA1), porque indicaram os melhores cenários de precipitação para a região sul do Brasil, dentro do Projeto CLARIS LPB. As precipitações geradas por esses modelos foram comparadas com a série histórica para verificar a sua consistência. Só assim são realizadas verificações de qual modelo é considerado como ideal para os estudos de tendências futuras nas precipitações.

Através da análise das séries simuladas, foi possível analisar como se distribuem as chuvas na cidade de Curitiba para o futuro, possibilitando tomada de medidas preventivas em diversos usos dos recursos hídricos na região, uma vez que a estação de Curitiba pode ser considerada representativa ou estação chave da região sul do Brasil, por sua localização e longo período de observações.

## 2. MÉTODOS

Os métodos apresentados nesta sessão são utilizados para identificação de tendências no período histórico. Muitos destes também são utilizados para a validação das simulações, tanto no período histórico, quanto no período futuro. Com base nas análises realizadas para o período histórico, é adotado o modelo que melhor representa o regime de chuvas na região de Curitiba.

### 2.1. EDA (*Exploratory Data Analysis*)

O exame visual dos dados é parte de um conjunto de técnicas chamado análise exploratória dos dados observados (EDA). Esta análise foi apresentada brevemente na revisão de literatura, mostrando alguns dos estudos realizados com a sua utilização. A EDA consiste no uso de gráficos e outros métodos heurísticos para explorar, entender e representar informações.

É um componente essencial para iniciar qualquer análise estatística. De acordo com KUNDZEWICZ e ROBSON (2000), uma pesquisa de não-estacionariedade que não contemple a EDA, é um estudo incompleto. Esta análise pode ser utilizada como ferramenta de interpretação estatística, como gradiente de tendências.

Diversas metodologias podem ser utilizadas na EDA para avaliar tendências em séries temporais, quais sejam: histogramas e sua relação com a distribuição de probabilidade normal, gráficos temporais e de correlação, testes de normalidade e dependência temporal e funções suavizadoras (KUNDZEWICZ e ROBSON, 2000).

Além da EDA, uma ferramenta importante para a verificação de tendências em séries hidrológicas é o ajuste de uma reta de regressão linear e a análise do seu coeficiente angular. Segundo PINTO *et al.* (1976) é verificado se o coeficiente angular desta reta é nulo por meio de um teste de hipótese. A reta de regressão é obtida pela impressão gráfica das variáveis em função do tempo. Em VARGAS *et al.* (2010), tendência secular refere-se a qualquer alteração de uma determinada variável (chuva) em longos períodos de tempo.

### 2.1.1. Análises gráficas

Como parte da EDA, a construção de gráficos é uma das maneiras mais eficientes para obter resultados preliminares para uma análise estatística. Tais métodos consistem na construção de histogramas, polígonos de frequência, curvas de permanência, curvas temporais de valores acumulados e estudo de frequência das precipitações anuais.

### 2.1.2. Curva Acumulativa

Um método de visualização dos dados é a construção da Curva Acumulativa que consiste na soma dos totais precipitados de toda a série em função do tempo. Os pontos são unidos e então é verificado se ocorre uma variação na declividade da reta ajustada aos pontos plotados. Caso ocorra tal mudança na declividade, a série é considerada como não estacionária, indicando uma alteração nos seus parâmetros estatísticos neste ponto.

### 2.1.3. Histograma de Frequências

Outra técnica de análise da EDA é a construção de Histogramas de Frequências. Os dados observados de chuva ou resultados de simulações são agrupados em classes com a intenção de se obter uma compreensão do padrão de variabilidade da variável aleatória (chuva) (MINE, 2013). Calcula-se então a frequência absoluta e relativa com que as mesmas ocorrem.

KOTTEGODA e ROSSO (2008) sugerem que o Número de Classes (NC) pode ser aproximado pelo inteiro mais próximo de  $\sqrt{N}$ , seguindo a regra de que  $5 < NC < 25$ , sendo que amostras com  $N < 25$ , não são significativas. Como indicação alternativa, é sugerida a regra de STURGES (1926), que tem a aproximação para o número de classes definida pela Equação (1).

$$NC = 1 + 3,3\log_{10}N \quad (1)$$

em que  $NC$  representa o número de classes e  $N$  o tamanho da amostra. Assim é possível calcular as frequências absoluta e relativa com que as precipitações ocorrem e construir o histograma de frequências.

#### 2.1.4. Polígono de Frequências

Com os dados calculados do Histograma de Frequências é possível obter o Polígono de Frequências que consiste em outra representação gráfica muito útil para diagnosticar o padrão de distribuição de uma variável. É obtido pela união dos pontos médios dos topos dos retângulos do histograma de frequência (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

#### 2.1.5. Curvas de Permanência

Segundo MINE (2013), outra ferramenta importante de interpretação estatística é elaboração das Curvas de Permanência. Elas mostram qual é a frequência com que uma precipitação pode ser igualada ou superada, dada certa probabilidade.

Para isso, ordenam-se as variáveis em ordem decrescente e atribui-se a elas uma respectiva ordem de classificação. A probabilidade de ocorrência das precipitações é representada pela Equação (2).

$$F = \frac{m}{n} \quad (2)$$

em que  $m$  corresponde a cada valor da ordem de classificação em ordem decrescente e  $n$  corresponde ao número total de dados observados de chuva. A visualização ocorre graficamente por meio de uma curva descendente.



### 2.1.6. Frequências Empíricas Acumuladas – FEA

Outra técnica importante para a EDA é o estudo das Frequências Empíricas Acumuladas (FEA), o qual é realizado de maneira análoga à construção da curva de permanência, com algumas peculiaridades. Neste caso as variáveis são ordenadas de forma crescente ( $x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_n$ ). A FEA é então representada pela Equação (3).

$$F(x_{(i)}) = \frac{i}{n + 1} \quad (3)$$

em que  $i$  corresponde a cada valor da ordem de classificação em ordem crescente e  $n$  corresponde ao número total de dados observados de chuva. A FEA corresponde a um estimador da função de distribuição acumulada (CDF – sigla em inglês) da variável em questão e pode ser comparada graficamente a CDF assumida.

## 2.2. Indicadores Estatísticos

### 2.2.1. Coeficiente de Determinação

Primeiramente, antes de ser realizado o cálculo do coeficiente de determinação, é sugerido que sejam elaborados diagramas de dispersão. É a representação conjunta de valores observados e simulados de uma mesma variável hidrológica. Sendo assim, o diagrama de dispersão permite que seja visualizado o grau de associação entre estas variáveis e uma possível tendência de variação conjunta que apresentam (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Segundo NAGHETTINI e PINTO (2007), a correlação entre essas duas variáveis é a observação da medida de variação conjunta entre elas. Tal medida é realizada através de coeficientes de correlação, representando o grau

de associação entre estas variáveis. As medidas de correlação  $\rho$  são adimensionais e se encontram no intervalo de  $-1 < \rho < 1$ . Quando ocorre  $\rho = 0$ , significa que não existe correlação entre as variáveis e quanto mais próxima de um, maior é a correlação entre elas.

De acordo com NAGHETTINI e PINTO (2007), quando duas variáveis apresentam uma correlação linear, os pontos de um diagrama de dispersão ficam mais próximos de uma reta. Sendo assim, o coeficiente de correlação linear é expresso pela Equação (4) e a covariância pela Equação (5).

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{X,Y}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (4)$$

$$\sigma_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} \quad (5)$$

em que  $\sigma_{X,Y}$  corresponde à covariância entre as variáveis  $X$  e  $Y$ ;  $\sigma_X$  é o desvio padrão da variável  $X$ ;  $\sigma_Y$  é o desvio padrão da variável  $Y$ ;  $\bar{x}$  é a média das observações  $X$ ;  $\bar{y}$  é a média das observações  $Y$ ;  $x_i$  corresponde à observação de  $X$ ;  $y_i$  corresponde à observação de  $Y$ ;  $n$  é o número de observações da amostra.

As variáveis  $X$  e  $Y$  apresentadas pela Equação (4) e Equação (5) correspondem aos valores das precipitações observadas e simuladas, respectivamente. O coeficiente de correlação linear, também conhecido como correlação linear de Pearson, indica a relação linear entre as duas variáveis. O coeficiente de correlação linear de Pearson elevado ao quadrado é o coeficiente de determinação.

### 2.2.2. Coeficiente de Nash-Sutcliffe

MORIASI *et al.* (2007) apresentaram o coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $NS$ ) com a intenção de avaliar o potencial de um modelo hidrológico em reproduzir as observações. É um ótimo indicador e amplamente utilizado para verificar o grau de confiabilidade entre simulações e registros observados. Ele testa a eficiência da simulação, sendo representado pela Equação (6).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (P_0^t - P_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (P_0^t - \bar{P}_0)^2} \quad (6)$$

em que  $\bar{P}_0$  é a média das chuvas observadas;  $P_m^t$  é a chuva obtida pela simulação no tempo  $t$ ;  $P_0^t$  representa a chuva observada no tempo  $t$ . MORIASI *et al.* (2007) mostram que o valor de  $NS$  pode variar no intervalo  $-\infty < NS < 1$ . Sendo assim, um número próximo de um corresponde a uma ótima relação, enquanto que valores mais próximos de zero não possuem relação entre si. Valores negativos indicam que a estimativa pela média dos valores observados é melhor do que a previsão pelo modelo.

Em outras palavras, pode-se afirmar que valores de  $NS$  muito baixos ocorrem quando a variância residual (numerador) é maior do que a variância dos dados observados (denominador). Essencialmente, quanto mais próximo de um, melhor é o grau de eficiência da simulação.

Segundo KRAUSE *et al.* (2005), o coeficiente de  $NS$  é um dos indicadores mais utilizados para validação de simulações. O coeficiente de determinação ou autocorrelação, também têm ampla utilização. Mas o valor de  $NS$  é mais sensível quanto à avaliação dos picos e apresenta melhores resultados nas condições de estiagens.

### 2.2.3. RMSE (*Root-Mean-Square Error*)

O erro quadrático médio ou *Root-Mean-Square Error* (RMSE) é frequentemente utilizado para observar as diferenças entre simulações e as observações para estimadores não tendenciosos (valores calculados). É o desvio padrão da diferença entre os registros históricos e os valores calculados por um modelo hidrológico.

HYNDMAN e KOEHLER (2006) mostraram que o  $RMSE$  é um bom estimador, mais utilizado para fins de comparação entre erros de previsão de modelos diferentes para uma variável e não entre variáveis. Depende da escala no qual é utilizado, sendo apresentado pela Equação (7).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (7)$$

em que  $X_{obs,i}$  corresponde à chuva observada em  $i$ ;  $X_{model,i}$  corresponde à chuva simulada em  $i$ ;  $n$  é o número de observações da amostra. Os valores de  $RMSE$  são utilizados para diferenciar o desempenho de uma simulação em relação a outras, e distinguir os valores observados dos calculados.

Frequentemente o  $RMSE$  é também usado no espaço logarítmico (que representa a diferença relativa entre as variáveis) quando então indica o desvio padrão do logaritmo da razão entre valores observados e modelados para estimadores não tendenciosos (FILL e STEDINGER, 1995).

#### 2.2.4. Outros indicadores estatísticos

Para avaliar o grau de sensibilidade das séries em estudo, ainda são analisados outros indicadores estatísticos. Estes consistem na média, mediana, variância, desvio padrão, excesso de curtose e assimetria das séries a um intervalo de confiança de 95%. Na sequência estão apresentados os estimadores pelas Equações (8), (9), (10), (11), (12) e (13) respectivamente.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (8)$$

$$\text{ÍMPAR} \rightarrow x_{md} = x_{\frac{n+1}{2}} \text{ e } \text{PAR} \rightarrow x_{md} = \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n+2}{2}}}{2} \quad (9)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (10)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (11)$$

$$g = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \times \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{s^3} \quad (12)$$

$$k = \frac{n^2}{(n-1)(n-2)(n-3)} \times \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{s^4} - 3 \quad (13)$$

em que  $X_i$  é o valor de um evento na posição  $i$ -ésima;  $n$  é o número total de elementos da amostra;  $\bar{X}$  é a média da amostra;  $x_{md}$  é a mediana da amostra;  $s^2$  é a variância da amostra;  $s$  é o desvio padrão da amostra;  $g$  é o coeficiente de assimetria;  $k$  é o excesso de curtose. A mediana é equivalente ao valor da variável  $x_{md}$  de modo que ocorra a separação da frequência total em duas metades de iguais dimensões.

#### 2.2.5. Método de correção de *bias*

Antes de ser realizada qualquer análise de uma série simulada, é necessário verificar se existem *bias* nas séries geradas pelos RCM. O *bias* é definido como sendo a tendenciosidade ou erro sistemático oriundo do processo de *downscaling* dos GCM para os RCM. O *bias* é então definido pela Equação (14).

$$bias = E(x_m - x_o). \quad (14)$$

em que  $x_m$  corresponde à simulação e  $x_o$  a chuva observada. São apresentados diversos métodos para correção de *bias* na literatura (BERG *et al.* 2012; TEUTSCHBEIN e SEIBERT, 2012; WATANABE *et al.*, 2012). Estes variam de acordo com a sua complexidade e ajustam desde o desvio padrão até a média e também o coeficiente de variação das séries simuladas pelos RCM. Quanto mais complexo for o método, maior é a necessidade da utilização de registros com espaço de tempo menor, como as escalas diárias.

Como não se teve acesso aos dados diários de precipitação simulados pelos RCM, é apresentado neste trabalho apenas um método para correção de *bias* (ROCHA, 2014), o método de correção por frequência, conforme proposto por SAURRAL (2010). Trabalha com a correção mensal dos valores baseados na diferença entre as observações e as simulações dos RCM. O método consiste em ajustar o primeiro momento das precipitações geradas pelos RCM ao dos registros históricos.

Os valores simulados são organizados em ordem crescente ( $x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_n$ ) e divididos em intervalos de classe. Cada intervalo tem um respectivo valor de correção de *bias*, obtido pela distância (no ponto médio) entre a curva dos valores observados e dos simulados, variando de 5% até 95% em intervalos de 10%. A Equação (15) apresenta a correção para a precipitação (SAURRAL, 2010).

$$\begin{aligned} P_{cor}(n) &= P_{sim}(n) - b_n, \text{ com} \\ b_n &= P_{sim}(n) - P_{obs}(n) \text{ para cada intervalo} \end{aligned} \quad (15)$$

em que  $P_{cor}(n)$  corresponde à precipitação com *bias* corrigido para o tempo  $n$ ;  $P_{sim}(n)$  corresponde à precipitação gerada pelo RCM no tempo  $n$ ;  $P_{obs}$  corresponde às precipitações observadas no tempo  $n$ ;  $b$  corresponde ao valor médio de correção de *bias* para cada intervalo (SAURRAL, 2010).

### 2.3. Regressão linear

A técnica da regressão linear é uma ferramenta poderosa para avaliar a existência de uma tendência secular nas variáveis hidrológicas. O método da regressão linear simples neste caso é representado pela Equação (16).

$$y_t = b_1 t + b_0 + \epsilon_t \quad (16)$$

em que  $t$  é um contador no tempo ( $t = 1, 2, \dots, n$ );  $y_t$  é a variável hidrológica (precipitação) no tempo  $t$ ;  $b_1$  consiste no coeficiente angular da reta;  $b_0$  é o coeficiente linear e  $\epsilon$  denota os erros da regressão. As hipóteses subjacentes são representadas pela Equação (17).

$$E(\epsilon) = 0, \quad E(\epsilon_t: \epsilon_\tau) = \begin{cases} 0 & \text{para } t \neq \tau \\ \tau^2 & \text{para } t = \tau \end{cases} \text{ e } VAR(\epsilon) = s^2 \quad (17)$$

Além disso, em geral se assume que o  $\epsilon$  seja normalmente distribuído. Os parâmetros  $b_1$  e  $b_0$  são estimados pelo método dos mínimos quadrados resolvendo as equações normais de Gauss, representadas pela Equação (18) e Equação (19) (JOHNSON, 1984).

$$n \times \widehat{b_0} + \left( \sum t \right) \widehat{b_1} = \sum y_t \quad (18)$$

$$\left( \sum t \right) \widehat{b_0} + \left( \sum t^2 \right) \widehat{b_1} = \sum y_t \times t \quad (19)$$

Tais coeficientes (angular e linear da reta de regressão linear) são estimados de acordo com o teorema de Gauss-Markov para os estimadores lineares não tendenciosos de mínima variância. Os parâmetros são características da amostra enquanto que os estimadores são funções que representam os parâmetros. Sendo assim, ao substituir os parâmetros  $b$  por seus estimadores resulta na Equação (20).

$$\widehat{y}_t = \widehat{b_1}t + \widehat{b_0} + e_t \quad (20)$$

em que  $e_t$  representa os resíduos da regressão e  $\widehat{y}_t$  o estimador de  $y_t$ . Para analisar a existência da estacionariedade, testa-se a hipótese nula  $H_0: b_1 = 0$ . Sendo os resíduos das regressões lineares normalmente distribuídos, esta hipótese pode ser testada através do teste t de Student, representada pela Equação (21) (SHARMA *et al.*, 2000).

$$\tau = \left| \frac{\rho\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\rho^2}} \right| \quad (21)$$

em que  $\rho$  é o coeficiente de correlação entre os dados observados e as simulações dos RCM e  $n$  é o tamanho da amostra. A estatística do teste  $\tau$  segue uma distribuição t de Student sendo  $v = n - 2$  o número de graus de liberdade. Assim se  $\tau > t_{1-\alpha/2,v}$ , rejeita-se a hipótese nula com nível de significância  $\alpha = 5\%$  (JOHNSON, 1984).

## 2.4. Método dos Mínimos Quadrados

O Método dos Mínimos Quadrados consiste numa técnica matemática, que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de valores minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os registros observados e os valores simulados. Tais diferenças são conhecidas como resíduos (MEMÓRIA, 2004).

Basicamente, a análise de resíduos demonstra que, se o modelo for apropriado, os resíduos refletem as propriedades impostas pelo termo de erro do modelo. O resíduo é a contrapartida amostral do termo de erro estocástico. O erro consiste nas diferenças entre os valores reais dos valores estimados pela regressão.

O primeiro requisito para o método dos mínimos quadrados é de que os erros sejam aleatórios e que sua distribuição seja normal e independente com média nula. O segundo é de que o modelo seja linear nos parâmetros (variáveis apresentam relação linear entre si) (MEMÓRIA, 2004).

## 2.5. Funções suavizadoras

Existem muitas possibilidades de exploração gráfica de eventuais tendências em séries hidrológicas. Dentre as mais utilizadas constam a elaboração de histogramas em conjunto com o gráfico de probabilidade normal, diagramas temporais, gráficos de correlação e as chamadas curvas suavizadoras.

De acordo com GRAYSON *et al.* (1996), dentre as técnicas descritas acima, as mais simples e comumente usadas no estudo de tendências são as funções suavizadoras, onde se inserem a média e mediana móveis. Com isto, os dados são suavizados, projetando os valores no período de previsão, com base no valor da média ou mediana da variável em um número específico de períodos anteriores.

Com o uso da mediana ao invés da média, os resultados podem ser mais satisfatórios, uma vez que a mediana é uma medida mais robusta de tendência central e menos influenciada por eventuais *outliers*. Estes últimos



são conhecidos também como eventos atípicos, ou fora dos padrões dos estudos.

## 2.6. Regressão LOWESS (*Locally Weighted Scatterplot Smoothing*)

Uma função suavizadora muito utilizada é a regressão LOWESS que consiste numa abordagem computacional intensiva, baseada no ajuste da regressão linear por mínimos quadrados para subconjuntos da amostra, de modo a construir uma função que descreva a parte determinística da variação dos dados ponto a ponto (ALEXANDRE, 2009; CLEVELAND, 1979).

A cada ponto da amostra, um polinômio de baixo grau é ajustado a um subconjunto de valores da variável explicativa próximos ao ponto considerado. Os coeficientes do polinômio são estimados a partir de uma análise de mínimos quadrados ponderados, em que pesos são atribuídos aos pontos do subconjunto, em função da sua proximidade ao ponto de interesse. A estimativa pela regressão no ponto é obtida, então, a partir dos valores da variável explicativa na vizinhança daquele ponto. O ajuste é completado após terem sido calculadas as estimativas de regressão para cada um dos  $n$  pontos de dados do conjunto (ALEXANDRE, 2009).

Os subconjuntos são delimitados a partir da escolha do fator de alisamento  $f$ , que determina a proporção de dados que serão utilizados. O fator  $f$  varia de  $(d + 1) / n$  a 1, sendo  $d$  o grau do polinômio. Portanto, a faixa do subconjunto é determinada pelo produto  $f \times n$ , que sofre arredondamento para o número inteiro mais próximo, de pontos próximos àquele em foco (ALEXANDRE, 2009).

O coeficiente de alisamento é denominado assim por ter a função de controlar a flexibilidade da função de regressão. Quanto menor o  $f$  mais a regressão final irá se tornar aderente a todos os dados da amostra. Entretanto, quanto mais aderente aos dados, maior será a chance da função de regressão, eventualmente, incorporar erros e/ou inconsistências amostrais (ALEXANDRE, 2009).

Para atribuir pesos ao subconjunto de dados, utiliza-se a função de ponderação tri cúbica, para a qual se atribui o maior peso aos dados próximos ao ponto de estimação. A ponderação parte da premissa de que pontos

próximos entre si são mais inter-relacionados do que pontos mais distantes. Assim, pontos distantes influenciariam menos a estimativa dos parâmetros do modelo local (ALEXANDRE, 2009). A função tri cúbica é expressa pelas Equações (22) e (23).

$$w(x) = (1 - |x|^3)^3, \text{ para } |x| < 1 \quad (22)$$

$$w(x) = 0, \text{ para } |x| \geq 1 \quad (23)$$

em que  $w(x)$  representa as ordenadas em função do eixo  $x$  e o peso atribuído a cada ponto;  $x$  a distância de um dado amostral ao ponto de interesse, dividida pela maior distância presente no subconjunto.

Segundo CLEVELAND (1979) e ALEXANDRE (2009) a maior vantagem da regressão não paramétrica do tipo LOWESS é de não haver a necessidade de se prescrever, *a priori*, uma função ou um modelo paramétrico específico para ser ajustado à amostra. Basta fornecer um fator de alisamento e o grau do polinômio local, o qual pode ser simplesmente de grau 1. Embora a técnica LOWESS não seja facilmente computada, ela é fornecida como rotina básica no *software* STATISTICA, utilizado nesta dissertação.

## 2.7. RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sums*)

Segundo ALEXANDRE *et al.* (2010) e ALEMAW e CHAOKA (2002) esta é uma importante ferramenta preliminar para inspeção visual de séries hidrológicas. De acordo com ALEMAW e CHAOKA (2002), utiliza-se o método RAPS para ter uma melhor sensibilidade dos dados, guiar e focar os testes e análises estatísticas. A soma do RAPS de uma função  $Y(t)$  é definida pela Equação (24).

$$X_k = \sum_{t=1}^k \frac{Y(t) - \bar{Y}}{S_Y} \quad (24)$$

sendo o valor de  $k = 1, 2, \dots, n$ . A variável  $X_k$  representa o RAPS no limite  $k$ ,  $Y(t)$  denota o valor da variável no instante  $t$ ,  $\bar{Y}$  é a média dos valores da amostra;  $S_Y$  o desvio padrão da amostra,  $k$  o contador limite da soma atual e  $n$  é o tamanho da amostra. No entanto, a variância das séries de RAPS é definida pela Equação (25).

$$VAR[X_k] = VAR \left[ \frac{1}{\sigma} \left( \sum_{t=1}^k Y(t) - \frac{k}{n} \sum_{t=1}^n Y(t) \right) \right] = \frac{k(n-k)}{n} \quad (25)$$

A equação acima mostra que a variância do RAPS segue uma relação parabólica com o valor extremo ocorrendo quando  $k = n/2$  e o valor mais baixo quando  $k = n$  e/ou  $k = 0$ . O valor esperado do RAPS depende do cenário da tendência ou da variabilidade nas séries históricas  $Y(t)$ .

## 2.8. Testes Estatísticos

Um problema comum e prático na análise de séries históricas de dados hidrometeorológicos consiste em encontrar técnicas estatísticas para verificar se estão ocorrendo variações ao longo do período (BUISHAND, 1984). Para isso, foram utilizadas algumas técnicas estatísticas no presente trabalho. Os métodos aplicados estão descritos nos próximos parágrafos.

### 2.8.1. Testes Paramétricos

Os testes paramétricos são conhecidos por possuírem dados extraídos de uma população dita Normal, ou de qualquer outra população, onde se conheça o modelo distributivo (ALEXANDRE, 2009). Na sequência são apresentados os testes paramétricos  $t$  de Student e  $F$  de Snedecor. Ambos os testes, valem estritamente para populações normais e por isso é sempre importante utilizar o teste de normalidade. Em caso de rejeição da hipótese para um nível de significância 5%, deve-se realizar a transformação para a normal.

#### 2.8.1.1. Teste $t$ de Student

De acordo com SILVEIRA (2000), o teste  $t$  de Student ( $t$ -test) avalia a igualdade das médias populacionais correspondentes a duas amostras. Geralmente ocorre o desconhecimento dos valores populacionais das variâncias, que são supostas como iguais.

Para valores de  $n > 3$ , esta distribuição é simétrica em torno de zero. A distribuição  $t$  possui caudas da distribuição mais elevadas em relação às da distribuição normal reduzida. Para  $n \rightarrow \infty$  a distribuição  $t$  tende à distribuição normal. Sendo assim, a estatística do teste é calculada pela Equação (26).

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{S_X^2}{n_X} + \frac{S_Y^2}{n_Y}}} \quad (26)$$

em que  $t$  representa a estatística do teste  $t$  de Student;  $\bar{X}$  representa a média amostral de  $X$ ;  $\bar{Y}$  representa a média amostral de  $Y$ ;  $S_X$  representa o desvio padrão da amostra  $X$ ;  $S_Y$  representa o desvio padrão da amostra  $Y$ ;  $n_X$  é o número de dados da amostra  $X$  e  $n_Y$  é o número de dados da amostra  $Y$ .

Deve-se comparar o valor calculado de  $t$  com um valor crítico da distribuição  $t$  de Student, com  $v = n_X + n_Y - 2$  graus de liberdade. Caso o módulo de  $t$  calculado seja inferior ou igual ao valor tabelado  $\alpha/2$ , é aceita a hipótese nula de igualdade das médias, caso ocorra o contrário, é rejeitada a hipótese.

#### 2.8.1.2. Teste $F$ de Snedecor

De acordo com TROGER *et al.* (2001), o teste  $F$  de Snedecor avalia a igualdade ou não das variâncias populacionais de duas subamostras. Realiza-se a consideração de que as variâncias amostrais de duas amostras

independentes são retiradas de duas populações normais. Demonstra-se que o quociente entre estas variâncias amostrais é um valor maior que segue uma distribuição  $F$ .

Em SILVEIRA (2000), é visto que o valor da estatística do teste  $F$  de Snedecor, com  $v_X$  graus de liberdade no numerador e  $v_Y$  graus de liberdade no denominador é dada pela Equação (27).

$$F_{n_{x-1}, n_{y-1}} = \frac{S_X^2}{S_Y^2} \quad (27)$$

em que  $F_{n_{x-1}, n_{y-1}}$  representa a estatística do teste  $F$  de Snedecor;  $S_X^2$  é a variância da amostra  $X$ ;  $S_Y^2$  é a variância da amostra  $Y$ , sendo  $S_X^2 > S_Y^2$ . Assim, são testadas se as duas amostras podem ser consideradas como oriundas da mesma população, dado um nível de significância do teste  $F$ .

Finalmente, compara-se o valor crítico da distribuição (tabelado) com  $n_{x-1}$  e  $n_{y-1}$  graus de liberdade com o valor de  $F$  calculado. Se aceita a hipótese de igualdade das variâncias, caso o valor calculado seja inferior ou igual ao obtido da tabela.

## 2.8.2. Testes Não Paramétricos

Os testes não paramétricos utilizados neste trabalho são aplicados para verificar se ocorrem tendências na série hidrológica e nas simulações. De acordo com ALEXANDRE (2009), tais testes são aqueles que não precisam de uma especificação prévia do modelo distributivo da população, sendo assim, embasados em características das amostras.

Estas características podem ser descritas como ordens de classificação ou valor quantitativo de diferenças negativas ou positivas entre os dados. Na sequência são apresentados os testes não paramétricos a serem aplicados neste trabalho: coeficiente de Spearman, Wilcoxon ou Mann-Whitney, Mann Kendall e Mann Kendall Sazonal.

### 2.8.2.1. Teste do coeficiente de Spearman

O teste do coeficiente de Spearman ou da correlação ordenada de Spearman é um teste de independência entre  $x_i$  e  $y_i$ . A primeira variável corresponde à série na ordem natural e a segunda a série ordenada crescente. Consiste em calcular o coeficiente de correlação das respectivas ordens de  $x$  e  $y$  no conjunto de todos os pares de dados. Serve para identificar uma possível tendência ao longo do tempo, ou seja, valores negativos ou positivos (SILVEIRA, 2000).

Sendo assim, o coeficiente de Spearman é obtido pela Equação (28).

$$\rho_S = 1 - \frac{6}{n^3 - n} \sum_{i=1}^n (Rx_i - Ry_i)^2 \quad (28)$$

em que  $\rho_S$  é o coeficiente de Spearman;  $Rx_i$  representa a ordem do elemento  $x_i$  na série em ordem natural;  $Ry_i$  representa a ordem do elemento  $x_i$  na série ordenada na forma crescente;  $n$  é o número de elementos da amostra.

De acordo com os estudos de NAGHETTINI e PINTO (2007), o coeficiente calculado pela Equação (28) é definido como sendo uma variável aleatória com distribuição simétrica. A variância e a média são calculadas pela Equação (29).

$$E(\rho_S) = 0 \text{ e } VAR(\rho_S) = \frac{1}{n-1} \quad (29)$$

Em SILVEIRA (2000), é sugerido que a estatística do teste siga aproximadamente uma distribuição t de Student, porém com  $n - 2$  graus de liberdade. Tal estatística é dada pela Equação (30).

$$t_{n-2} = \sqrt{\frac{(n-2)\rho_S^2}{(1-\rho_S^2)}} \quad (30)$$

De acordo com TROGER *et al.* (2001), a estatística  $t_{n-2}$  é comparada bilateralmente com o valor de  $t$  crítico, obtido da tabela de Student, para um dado nível de significância. Caso o valor de  $t_{n-2}$  seja maior do que o obtido pela tabela  $t_{n-2,\alpha}$ , a hipótese de independência das amostras é rejeitada.

#### 2.8.2.2. *Teste de Wilcoxon ou Mann-Whitney*

O teste de Wilcoxon, ou teste  $U$  foi inicialmente proposto por MANN e WHITNEY (1947), sendo o seu nome atribuído a estes autores. A aplicação deste teste é realizada separando a amostra em duas subamostras, sendo o ponto de separação definido geralmente pelos gráficos da EDA.

O objetivo do teste de Mann-Whitney (Wilcoxon) é definir o grau de mistura entre as subamostras, verificando se ambas podem ter a mesma distribuição de probabilidades. Sendo assim, de acordo com TROGER e PANTE (2009), a estatística de  $U$ , que caracteriza o teste, é a soma das ordens dos valores contidos na primeira subamostra, menos uma constante, conforme a Equação (31).

$$U = \sum_{i=1}^{n_1} Rx_i - \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} \quad (31)$$

em que  $Rx_i$  é a ordem crescente dos valores da primeira série;  $n_1$  é o número de elementos da primeira subamostra;  $n_2$  é o número de elementos da segunda subamostra (DEVORE 1991). A média  $E(U)$  e a variância  $VAR(U)$  são obtidas pela Equação (32).

$$E(U) = \frac{n_1 n_2}{2} \text{ e } VAR(U) = \frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12} \quad (32)$$

O valor da estatística do teste  $Z$  é calculado pela Equação (33).

$$Z = \frac{U - E(U)}{\sqrt{VAR(U)}} \quad (33)$$

Para valores de  $n_1, n_2 > 8$  a estatística  $Z$  segue aproximadamente uma distribuição normal padrão. Para  $n_1, n_2 < 8$ , os valores críticos de  $Z$  são tabelados, conforme pode ser visto em DEVORE (1991).

O valor de  $Z$  calculado é então comparado com o valor de  $Z_{crítico}$  (tabelado), obtido da distribuição normal padrão. Caso o módulo de  $Z$  calculado seja maior que o valor de  $Z_{crítico}$ , significa que as duas subamostras da série não são da mesma população.

#### 2.8.2.3. Teste de Mann Kendall

É muito utilizado para a verificação da homogeneidade de séries hidrológicas. Inicialmente este teste foi utilizado por MANN (1945), depois por KENDALL e STUART (1963), que criaram a correspondente estatística do teste. A sua aplicação tem evidenciado consistentes resultados, pois, segundo os pesquisadores, uma vantagem deste teste é de que os resultados tem uma interpretação fácil e se aplicam a todo período em estudo (BACK, 2001; BARROS *et al.*, 2011; BUCHIR, 2013; MÜLLER *et al.*, 1998).

Estes mesmos pesquisadores afirmam que o teste de Mann Kendall é o método mais apropriado para analisar mudanças climáticas em séries climatológicas, pois, permite também a detecção e localização aproximada do ponto inicial de determinada tendência (BACK, 2001; BARROS *et al.*, 2011; BUCHIR, 2013; MÜLLER *et al.*, 1998).

O teste consiste na comparação de cada valor da série temporal com os outros restantes, sempre em ordem temporal. Então, conta-se o número de vezes que os termos restantes são maiores que o analisado. A estatística do teste  $S_{MK}$  é dada pela Equação (34).

$$S_{MK} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=j+1}^n \text{signal}(R_j - R_i) \quad (34)$$



em que  $n$  é o número de observações;  $R_i$  é a observação anterior;  $R_j$  é a observação posterior;  $i$  representa a posição de  $R_i$  no tempo anterior;  $j$  representa a posição de  $R_j$  no tempo posterior. O sinal é definido pelas seguintes condições, conforme a Equação (35).

$$\text{sin}al(R_j - R_i) = \begin{cases} 1, \text{ se } R_j - R_i > 0 \\ 0, \text{ se } R_j - R_i = 0 \\ -1, \text{ se } R_j - R_i < 0 \end{cases} \quad (35)$$

É possível aplicar o teste de Mann Kendall para tendência somente se a série for serialmente independente. Então, são testadas se as observações da série são independentes e identicamente distribuídas, em outras palavras, testam-se as hipóteses:

$H_0$ : As observações da série são independentes e identicamente distribuídas;  $H_1$ : As observações da série possuem tendência no tempo.

É possível mostrar que sob a hipótese nula  $S_{MK}$  é normalmente distribuída com média nula, de acordo com a Equação (36).

$$E(S_{MK}) = 0 \text{ e } VAR(S_{MK}) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (36)$$

Quando o número de observações é superior a 30, a estatística do teste é calculada pela Equação (37).

$$MK = \begin{cases} \frac{S_{MK} - 1}{\sqrt{VAR(S_{MK})}}, \text{ se } S_{MK} > 0 \\ 0, \text{ se } S_{MK} = 0 \\ \frac{S_{MK} + 1}{\sqrt{VAR(S_{MK})}}, \text{ se } S_{MK} < 0 \end{cases} \quad (37)$$

Sendo assim, mesmo para um número de observações inferiores a 30, é possível utilizar a estatística  $MK = Z$  para realizar o teste. Em um teste bilateral, rejeita-se a hipótese nula  $H_0$  para certo nível de significância  $\alpha$ , no

caso do valor do quartil  $Z_{\alpha/2}$ , seguir uma distribuição normal padrão, ou seja,  $MK \leq Z_{\alpha/2}$ . A programação para aplicação do teste foi desenvolvida utilizando o software MATLAB.

#### 2.8.2.4. Teste de Mann Kendall Sazonal

Proposto por HIRSCH *et al.* (1982) e aperfeiçoado por HIRSCH e SLACK (1984), o teste de Mann Kendall Sazonal (MKS), surgiu de acordo com a necessidade de lidar com dificuldades impostas por eventuais sazonalidades em séries temporais de clima. Este teste é resultante de uma adaptação do teste de Mann Kendall, sendo apresentado como uma alternativa para contornar as dificuldades impostas pela elevada variabilidade sazonal das observações (BUCHIR, 2013).

Contudo, FISCH e FOLHES (2006), afirmam que este teste é bem recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para estudos de detecção de tendências ou alterações abruptas em séries de variáveis climáticas. Segundo os autores LETTENMAIER *et al.* (1994) e BLAIN (2011), no caso de séries mensais, o MKS pode ser calculado organizando os dados mensais em forma de matriz. As colunas são preenchidas com os valores da série relativos a cada mês do ano e o fator  $T_j$  é inicialmente estimado para cada mês, conforme a Equação (38).

$$S_{MKS} = \sum_{j=1}^{12} T_j, \text{ para } T_j = \sum_{k>1} \text{sin}al(Z_{1j} - Z_{kj}), \text{ para } j = 1, 2, \dots, 12 \quad (38)$$

e a variância do fator  $T_j$  é representada pela Equação (39).

$$VAR(T_j) = \frac{n_j(n_j - 1)(2n_j + 5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i - 1)(2t_i + 5)}{18} \quad (39)$$

em que  $n_j$  é o número de valores de cada série  $j$  mensal;  $j$  é o número de meses do intervalo a ser analisado;  $k$  é o número de meses da série;  $m$  é o número de grupos de valores adjacentes iguais;  $t_i$  é o número de valores presentes em cada um dos grupos  $i$ ;  $k$  é o valor da série no instante posterior;  $i$

é o tamanho da repetição;  $z_{1j}$  é a posição de  $z_1$  no tempo anterior;  $z_{kj}$  é a posição de  $z_k$  no tempo posterior. O valor final do  $MKS$  é dado pela Equação (40).

$$MKS = \begin{cases} \frac{S_{MKS} - 1}{\sqrt{VAR(S_{MKS})}}, & \text{se } S_{MKS} > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S_{MKS} + 1}{\sqrt{VAR(S_{MKS})}}, & \text{se } S_{MKS} < 0 \end{cases} \quad (40)$$

Assim, a hipótese nula é rejeitada no nível de significância  $\alpha$  se  $MKS > Z_{crit}$ . O valor de  $Z_{crit}$  é obtido da tabela de distribuição normal com a probabilidade de  $Z_{\alpha/2}$ . A programação para aplicação do teste foi desenvolvida utilizando o *software* MATLAB.

## 2.9. Resumo do Capítulo

Neste capítulo, foram apresentados todos os métodos utilizados na pesquisa. Primeiramente foram descritos os métodos que contemplam a EDA, tais como análises gráficas, curvas acumuladas em função do tempo, histogramas e polígonos de frequências, curvas de permanência e estudo das frequências empíricas acumuladas (FEA).

Na sequência, foram apresentados os cálculos dos indicadores estatísticos, tais como coeficientes de determinação, NS, RMSE, entre outros. Também foram apresentadas as regressões linear e LOWESS, bem como o método RAPS, funções suavizadoras e os testes estatísticos aplicados com o intuito de verificar se ocorrem tendências nas séries.

Os testes estatísticos utilizados nesta dissertação foram: t de Student, F de Snedecor, coeficiente angular da reta de regressão linear, rho de Spearman, Mann-Whitney, Mann Kendall e Mann Kendall Sazonal. Na sequência, é apresentada uma breve descrição da área de estudos, bem como dos dados que foram utilizados para as análises.

### 3. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E DADOS UTILIZADOS

O foco dos estudos deste trabalho está concentrado na cidade de Curitiba, situada no estado do Paraná, Brasil. A estação pluviométrica que serviu de base para as análises se encontra na bacia do rio Iguaçu. Tal estação está localizada na capital paranaense, conforme é apresentado nos próximos subitens. A mesma já esteve presente em algumas localidades na cidade.

#### 3.1. Curitiba

Curitiba é a capital do estado do Paraná, sendo a oitava maior cidade do país em termos populacionais. A cidade está localizada a aproximadamente 924 m de altitude e tem uma população de 1,75 milhões de habitantes. É a principal cidade da Região Metropolitana de Curitiba (RMC), formada por 29 municípios com um total de 3,4 milhões de habitantes sobre uma área de 15,5 mil km<sup>2</sup> (IBGE, 2013). É a oitava região metropolitana mais populosa do Brasil e a segunda maior da região Sul, ficando atrás somente da região metropolitana de Porto Alegre.

Foi fundada em 1693 e se tornou capital do Estado em 1853 e desde então manteve seu ritmo acelerado de crescimento urbano que foi fortalecido com a chegada de imigrantes europeus de diversas nacionalidades. A cidade conta com as menores taxas de analfabetismo e melhor qualidade de educação básica entre as demais capitais brasileiras. Nos últimos anos tem se consolidado como a cidade mais rica do sul do país e a quarta em nível nacional.

É a cidade brasileira com o quarto maior Produto Interno Bruto (PIB) do país. Na capital paranaense, estão concentradas mais intensamente as atividades industriais, comerciais e de serviços. Dos ramos industriais presentes na cidade, os que mais se destacam são o automobilístico, alimentício, mobiliário, minerais não metálicos, madeira, produtos químicos e farmacêuticos, bebidas e artefatos de couro e pele.

Curitiba é também considerada como a terceira cidade mais sagaz do mundo, por ter em seu planejamento e gestão uma preocupação em ser ecologicamente sustentável, com qualidade de vida, boa infraestrutura e

dinamismo econômico. Devido à sustentabilidade é conhecida como a Capital Ecológica Brasileira. É uma das cidades mais influentes no cenário global, considerada também como um dos centros mais globalizados do planeta.

As principais cidades que compõem a RMC são: Almirante Tamandaré, Araucária, Campo Largo, Colombo, Fazenda Rio Grande, Pinhais, Piraquara, Quatro Barras, Rio Branco do Sul e São José dos Pinhais. Estas cidades fazem parte do grande polo econômico social que movimenta uma das maiores economias nacionais.

Na RMC encontram-se as nascentes do rio Iguaçu, um dos rios mais importantes do estado. Os principais rios que constituem as seis bacias hidrográficas do município consistem nos rios: Atuba, Belém, Barigui, Passaúna, ribeirão dos Padilhas e rio Iguaçu. Devido o relevo de Curitiba possuir predominância de maiores altitudes ao norte do município, as águas das seis bacias hidrográficas desembocam ao sul do município, no rio Iguaçu, este que deságua no rio Paraná.

As enchentes que ocorrem na cidade são um constante motivo de preocupação para a população e administração pública. Curitiba possui um clima subtropical úmido, com temperaturas médias entre 11°C e 23°C, no inverno e verão respectivamente. Porém estas temperaturas podem ser mais altas ou mais baixas, de acordo com as épocas do ano.

Segundo o INMET (2013) e FILL *et al.* (1999), entre os anos de 1961 e 2013, a menor temperatura registrada em Curitiba foi de -5,4°C, em setembro de 1972. A máxima registrada foi de 35,2°C em novembro de 1985. A cidade já presenciou eventos como a neve, porém esta não é frequente, podendo ocorrer mais de uma década sem registros de neve. A precipitação média anual de Curitiba é da ordem de 1.400 mm, contando com uma média de 164 dias de chuva por ano. A umidade relativa da capital situa-se em torno de 80,7%.

A estação pluviométrica Curitiba, objeto de estudo para as análises deste estudo, se encontra no bairro Guabirota, dentro do trecho Alto Iguaçu, bacia do mesmo rio. Na Tabela 1 são apresentadas algumas características da estação pluviométrica Curitiba (código da ANA: 02549006). Mais detalhes sobre a obtenção dos dados é apresentado posteriormente.

Esta estação atualmente se encontra no campus Centro Politécnico, da Universidade Federal do Paraná, nas coordenadas conforme a Tabela 1. A

mesma já esteve em outras localidades tal como no centro da capital paranaense, nas proximidades da Rua Mariano Torres. Também consta nos registros que a estação Curitiba já esteve localizada nos arredores da Rua Manuel Ribas (bairro Mercês) e também no município de Piraquara.

Tabela 1 – Dados da estação pluviométrica Curitiba (Fonte: O Autor, 2014).

Código	Nome	Localização	Bacia	Sub-bacia	Coordenadas		
					Lat.	Long.	Altitude (m)
2549006	Curitiba	Curitiba, PR	Rio Paraná	Rio Iguaçu	-25°27'	-49°14'	924

Como o objetivo deste trabalho é a análise de tendências no regime de chuvas na RMC, na sequência foi apresentada brevemente a bacia do rio onde está localizada a estação pluviométrica Curitiba, no rio Belém, sub-bacia do rio Iguaçu. A estação pluviométrica está representada pela Figura 1.

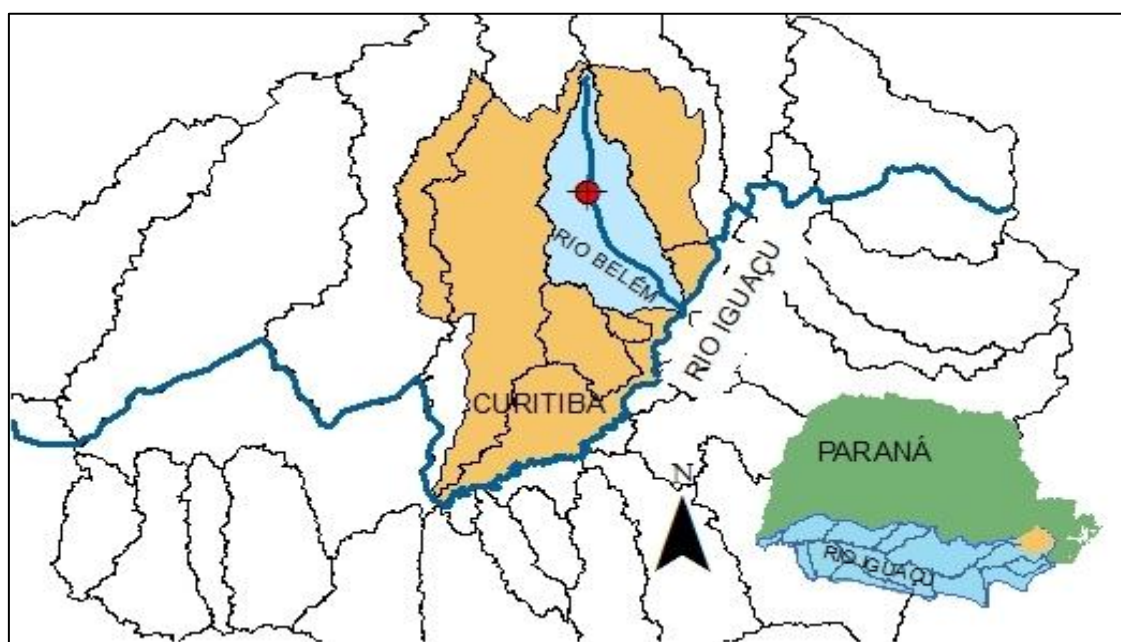


Figura 1 – Localização dos principais rios, capital e estação pluviométrica Curitiba (Fonte: O autor, 2014).

### 3.2. Bacia do Rio Iguaçu

A bacia hidrográfica do rio Iguaçu é de grande importância para o Brasil, sendo considerada a maior do estado do Paraná. Localizada na região Sul do Brasil, entre as latitudes 25°05'S e 26°45'S e longitudes 48°57'W e 54°50'W, possui uma área de drenagem de 69.400 km<sup>2</sup>. É uma sub-bacia do rio Paraná e também uma sub-bacia do rio da Prata, classificada pela Agência Nacional das Águas (ANA) pelo número 65. As nascentes do rio Iguaçu situam-se na porção oeste da Serra do Mar, com altitude em torno de 1.200 m, passando em seguida pelo Planalto de Curitiba (1° Planalto).

Após passar pelo segundo e terceiro planaltos do estado do Paraná, o rio Iguaçu desemboca no rio Paraná, junto à tríplice fronteira da Argentina, Brasil e Paraguai, com uma vazão média na exutória da bacia em torno de 1.550 m<sup>3</sup>/s. A bacia do rio Iguaçu está localizada numa das regiões de intenso desenvolvimento econômico do país. A área total da bacia é dividida entre os estados que a compõem, sendo 80,4% da área pertencendo ao Paraná. A área que compreende ao estado de Santa Catarina é de 16,5% e apenas 3% pertence à Argentina.

Devido à extensão do rio Iguaçu, comprimento total em torno de 1.320 km (de leste a oeste), faz com que a bacia do rio Iguaçu seja dividida em três sub-bacias: Alto, Médio e Baixo Iguaçu. A região de estudo deste trabalho compreende o Alto Iguaçu que é a região mais a montante da bacia, onde estão localizadas as nascentes, a RMC, a bacia do rio Belém e a estação pluviométrica Curitiba.

Na RMC, o rio Iguaçu é formado pela confluência entre os rios Iraí e Atuba. O rio Iraí nasce com o nome de rio Iraizinho na borda ocidental da Serra do Mar, no município de Piraquara. Ao passar pelo município de Pinhais, recebe as águas do rio Palmital, começando a ser denominado rio Iraí. Somente em Curitiba, a confluência entre os rios Iraí e Atuba é que formam o rio Iguaçu. O rio Iraí atravessa áreas densamente povoadas nos municípios de Pinhais e Piraquara.

O outro formador do rio Iguaçu é o rio Atuba. Grande parte de suas nascentes estão localizadas no município de Colombo, este que faz parte da

RMC. A entrada do rio Atuba na capital paranaense ocorre em Santa Cândida, bairro da região norte do município. A extensão do rio Atuba em Curitiba é de aproximadamente 23 km, possuindo grande parte de suas margens habitadas. O rio Iguaçu está representado na Figura 2.

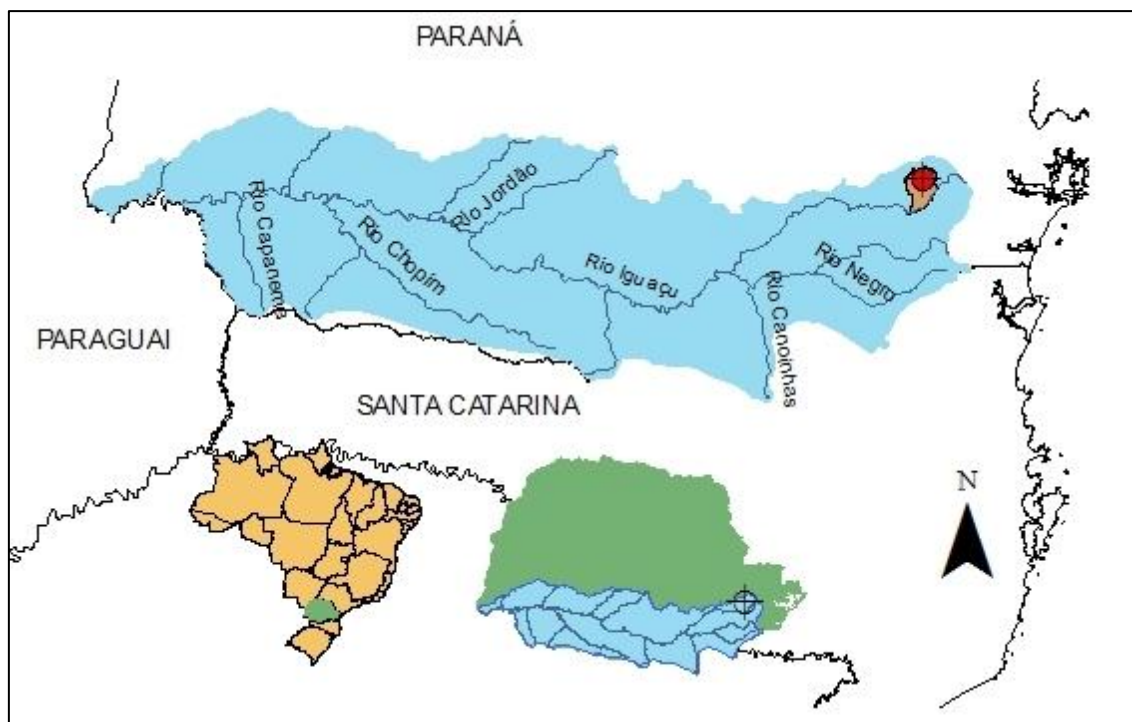


Figura 2 – Bacia do rio Iguaçu, principais rios, localização da capital e estação pluviométrica Curitiba (Fonte: O autor, 2014).

### 3.3. Dados utilizados

Os dados utilizados neste trabalho consistem em registros de chuva da estação pluviométrica Curitiba. Os registros históricos de chuvas são utilizados com a intenção de verificar tendências no período histórico. As observações de chuvas foram coletadas no sistema de informações hidrológicas *Hidroweb*, mantido pela ANA. Os registros históricos também são comparados com os cenários de precipitação gerados pelas simulações dos RCM. Os dados observados e cenários de precipitação foram organizados em dois grupos para a análise:



- Período histórico: contemplam as chuvas observadas em Curitiba e os cenários de precipitação gerados pelos RCM (ETA, PROMES e RCA1);
- Período futuro: contemplam apenas as chuvas geradas pelos RCM.

Fazem parte do trabalho a análise dos totais mensais e anuais, bem como as máximas e mínimas mensais anuais para as análises preliminares das chuvas observadas e dos cenários obtidos pelos RCM. Assim é possível avaliar qual modelo é mais representativo da série hidrológica na região.

Depois de selecionado o melhor RCM é realizada a análise dos totais mensais e anuais. Os totais sazonais (verão e inverno) e totais sazonais compreendendo as estações do ano, também são estudados. No Projeto CLARIS foi identificado que os modelos mais representativos para o sul do Brasil, são os citados anteriormente (MINE *et al.*, 2009).

### 3.4. Resumo do Capítulo

Neste capítulo, foi apresentada a região de estudos, bem como as características climatológicas, sociais e econômicas desta. Na sequência, foram apresentados os dados utilizados para as análises. No próximo capítulo estão descritas as análises iniciais realizadas na RMC.

#### 4. ANÁLISE DOS DADOS

A análise preliminar dos dados foi realizada utilizando os registros históricos observados e as simulações geradas pelos RCM. Cabe ressaltar que as séries geradas pelos modelos ETA, PROMES e RCA1 compreendem também o local das chuvas observadas. As séries simuladas pelo modelo RCA1 utilizaram o GCM ECHAM5. O PROMES utilizou o GCM HADCM3 e o modelo ETA utilizou o GCM T213L42 (ROCHA, 2014).

A análise de consistência dos dados observados e dos cenários de precipitação gerados pelos RCM foi realizada através de estudos das chuvas mensais, e das máximas e mínimas mensais anuais, no período histórico. O estudo foi elaborado utilizando as técnicas da EDA e análises estatísticas, conforme descrito no item 2.

##### 4.1. Análise do Período Histórico

O objetivo do estudo de consistência é analisar a qualidade das séries geradas pelos modelos e verificar se as simulações apresentam um comportamento tendencioso. Sendo assim, as séries simuladas foram comparadas com a série histórica através de análises estatísticas.

Estas análises foram realizadas utilizando a técnica EDA, como a comparação entre as estatísticas: média, mediana, variância, desvio padrão, excesso de curtose e assimetria. Também foram analisados outros indicadores estatísticos como o coeficiente de determinação, Nash-Sutcliffe e RMSE.

Como parte da análise preliminar, a EDA foi aplicada por meio de análises gráficas como a construção de histogramas, curvas de permanências, polígonos de frequência, estudo das frequências empíricas das chuvas máximas e mínimas mensais anuais, diagramas de dispersão entre as observações e os cenários de precipitação (observou-se a sua correlação). Os estudos foram realizados para as três simulações obtidas dos modelos do Projeto CLARIS LPB.

Antes de realizar qualquer análise, foram levantadas as falhas da série histórica. As mesmas não foram preenchidas e os anos em que as possuem

foram desconsiderados dos estudos, visto que a série histórica possui um período superior a 100 anos de observações. Também foram observadas falhas nas simulações obtidas pelo modelo ETA. Todas as falhas foram levantadas conforme é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Levantamento de falhas no período histórico (Fonte: O Autor, 2014).

Série Hidrológica Curitiba - 02459006	Meses	Modelo ETA
Dezembro de 1901 a maio de 1902	6	Janeiro de 2009 a dezembro de 2010
Janeiro de 1903 a julho de 1903	7	
Abril de 1912 a Janeiro de 1913	10	
Novembro de 1917 a dezembro de 1919	25	
Agosto de 1920 a novembro de 1920	4	
Setembro de 1921	1	
Abril de 1973	1	
Julho de 1988	1	
Dezembro de 1990 a abril de 1991	5	
Junho de 1991 a julho de 1991	2	
Outubro de 1991	1	
Novembro de 1994 a dezembro de 1994	2	
Março de 2011 a dezembro de 2011	10	
Total =	75	Total = 24 meses

Foi levantado um total de 75 meses com falhas na série histórica, em um período de 124 anos e três meses, ou mais precisamente 1.491 meses. O período histórico compreende observações entre janeiro de 1889 a março de 2013. O maior período com falhas pode ser observado entre os meses de novembro de 1917 a dezembro de 1919. Os outros períodos com falhas não superaram 10 meses, observados entre abril de 1912 a janeiro de 2013 e entre março de 2011 a dezembro do mesmo ano.

Falhas foram observadas também nas simulações obtidas pelo modelo ETA, entre o período de janeiro de 2009 a dezembro de 2010. O total de falhas observadas neste período é de 24 meses, conforme é apresentado na Tabela 2. A série gerada pelo modelo ETA compreende o período entre janeiro de 1961 até março de 2013, sendo este o período em comum com a série de chuvas observadas.

Nas séries simuladas pelos outros modelos não foram encontradas falhas, por isso não constam na Tabela 2. Cabe ressaltar que o período histórico da simulação obtida pelo modelo PROMES inicia em janeiro de 1960 e que o período histórico do modelo RCA1 inicia em janeiro de 1961.

Outro fato relevante é que se dispunha de três séries de chuva distintas, todas geradas pelo modelo RCA1 tanto para o período histórico (1961 – 2012), quanto para o período futuro (2012 – 2099). A seguir, as séries geradas pelo RCA1 que representam o período histórico foram denominadas em RCA1 – 01, RCA1 – 02 e RCA1 – 03.

#### 4.1.1. Correção de *bias*

Depois de verificados os períodos com falhas nas séries, foram aplicadas as correções de *bias* para todos os cenários das chuvas geradas pelos RCM, de acordo com o método apresentado no item 2. Todas as análises seguintes foram realizadas com os valores simulados corrigidos.

#### 4.1.2. EDA

Na sequência, foi aplicada a EDA. Primeiramente foram construídos os histogramas das chuvas mensais observadas e dos cenários gerados pelos RCM. Foi utilizada a frequência acumulada por Weibull para obter a Função de Distribuição Acumulada (FDA) empírica. Os resultados são apresentados graficamente.

Na Figura 3 é apresentado o histograma das chuvas mensais observadas na estação pluviométrica Curitiba (02549006). É observado que existem poucos registros de chuvas mensais superiores a 300 mm. É visto que a maior parte dos eventos de chuva mensais que ocorrem na bacia está na faixa de até 180 mm em todo o período histórico.

O mesmo estudo foi realizado no período histórico para as chuvas geradas pelos modelos ETA, PROMES e RCA1, sendo este último contando

com três cenários diferentes. Na Figura 4 e Figura 5 são observados os histogramas dos modelos ETA e PROMES (período histórico).

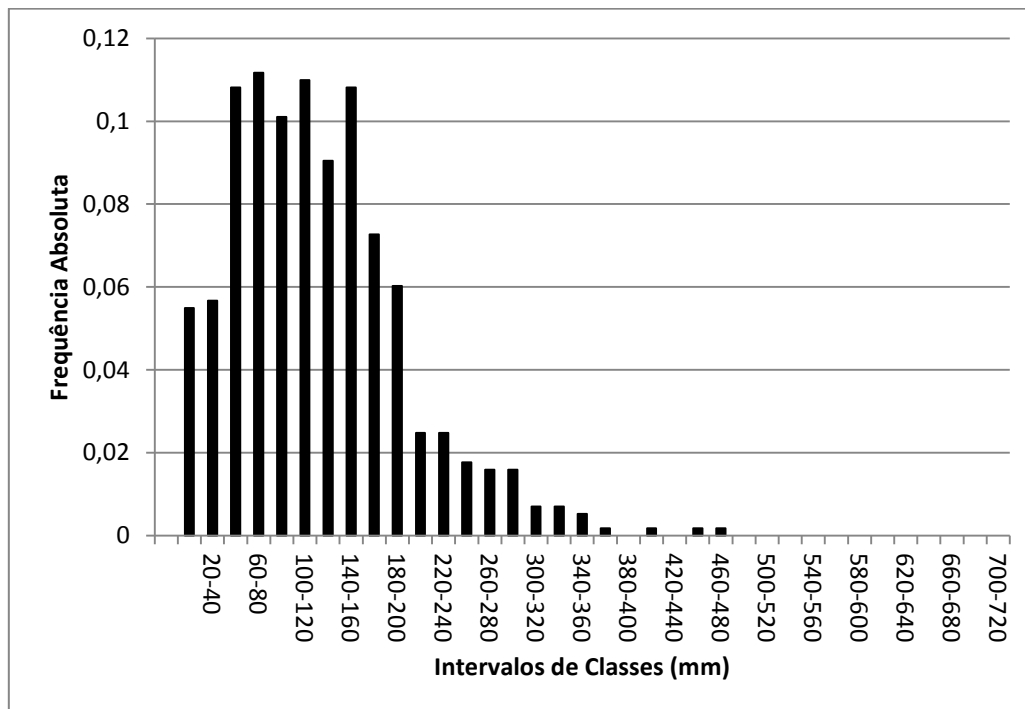


Figura 3 – Histograma de chuvas mensais observadas (Fonte: O Autor, 2014).

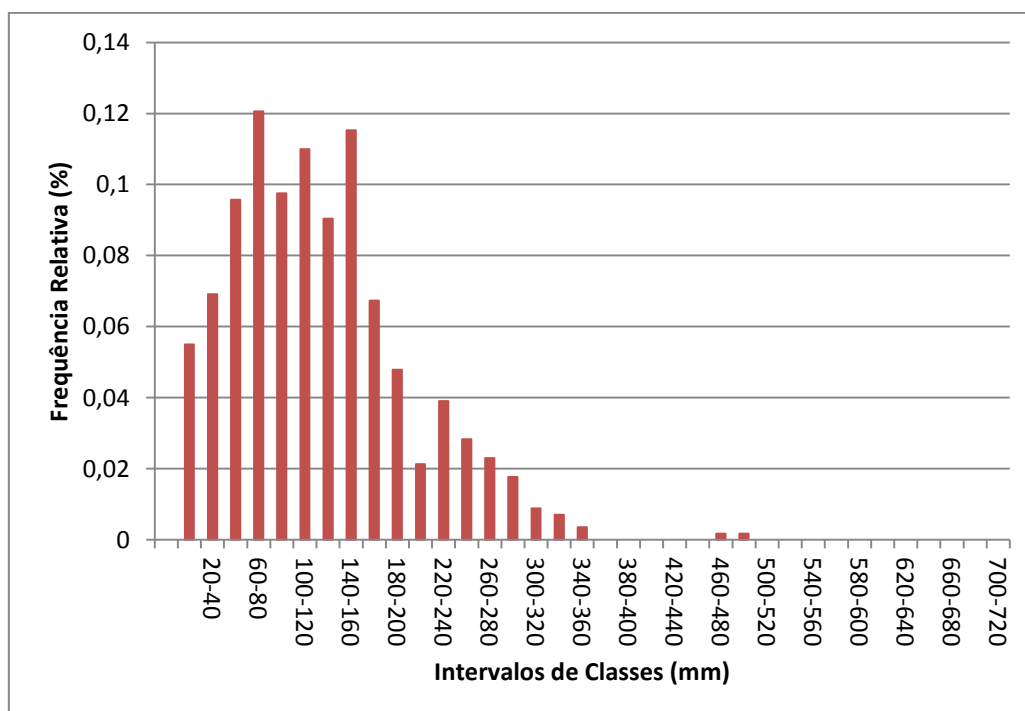


Figura 4 – Histograma de chuvas mensais obtidas pelo modelo ETA (Fonte: O Autor, 2014).

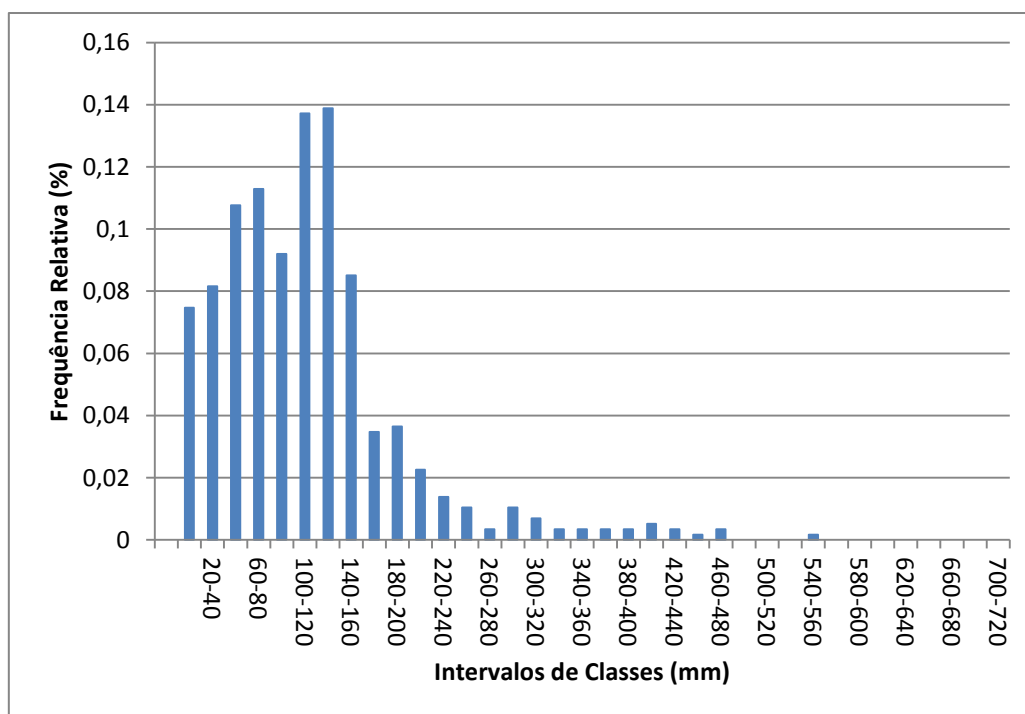


Figura 5 – Histograma de chuvas mensais obtidas pelo modelo PROMES (Fonte: O Autor, 2014).

Através da análise visual dos histogramas dos cenários de precipitação gerados pelos modelos ETA e PROMES (período histórico), observa-se uma grande diferença nos totais mensais precipitados. A Figura 4, mostra que a simulação obtida pelo modelo ETA possui um comportamento similar ao das chuvas observadas no período histórico. Isto porque a maior parte das simulações encontra-se no intervalo de até 180 mm. Também é observado que a frequência de chuvas simuladas acima de 300 mm é pequena.

O mesmo não ocorre com o histograma das chuvas geradas pelo modelo PROMES. De acordo com a Figura 5 é observado que a maior parte das precipitações ocorre numa frequência diferente à das chuvas observadas na estação Curitiba, ou seja, maiores chuvas no mesmo intervalo (e.g. chuvas entre 120 – 160 possuem uma frequência relativa de aproximadamente 0,14%, enquanto que o mesmo intervalo para as chuvas observadas corresponde a uma frequência de 0,11% no máximo). Outra relevância na observação da Figura 5 é que são mais frequentes as chuvas intensas geradas pelo PROMES em relação ao histograma das chuvas observadas (Figura 3).

Os registros de chuvas mensais superiores a 300 mm são pouco mais frequentes, indicando preliminarmente que o modelo PROMES não representa

bem as precipitações de Curitiba. O cenário gerado pelo ETA foi mais apropriado para representar a região, de acordo com a análise dos histogramas.

Continuando nas análises gráficas, os cenários de precipitação gerados pelo modelo RCA1 originaram três séries para o mesmo modelo. Foram elaborados os histogramas para todas as séries hidrológicas geradas pelo modelo RCA1. Uma observação importante é que as três séries geradas pelo RCA1 possuem a mesma extensão, ou seja, iniciam e terminam no mesmo período, sem falhas, conforme dito anteriormente. A Figura 6, Figura 7 e Figura 8 mostram as chuvas geradas por este modelo.

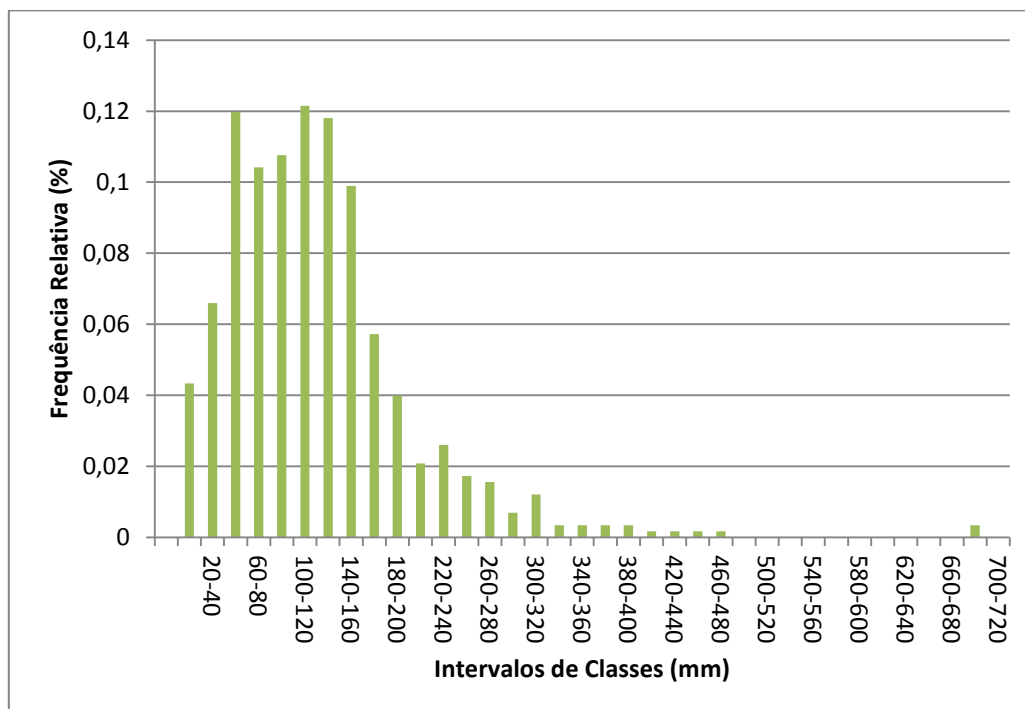


Figura 6 – Histograma de chuvas mensais obtidas pelo modelo RCA1 – 01 (Fonte: O Autor, 2014).

Observa-se através da análise dos histogramas gerados pelas simulações do modelo RCA1 (Figura 6), que as chuvas apresentam um comportamento “similar” com o que acontece na estação Curitiba. Na análise da Figura 7, observa-se que possuem maior ocorrência, chuvas que não contemplam o mesmo intervalo das chuvas observadas, ou seja, elas ocorrem, porém não com a mesma frequência e/ou intensidade que as chuvas

observadas. Isso indica que o RCA1 – 02 não representa bem o período histórico em Curitiba.

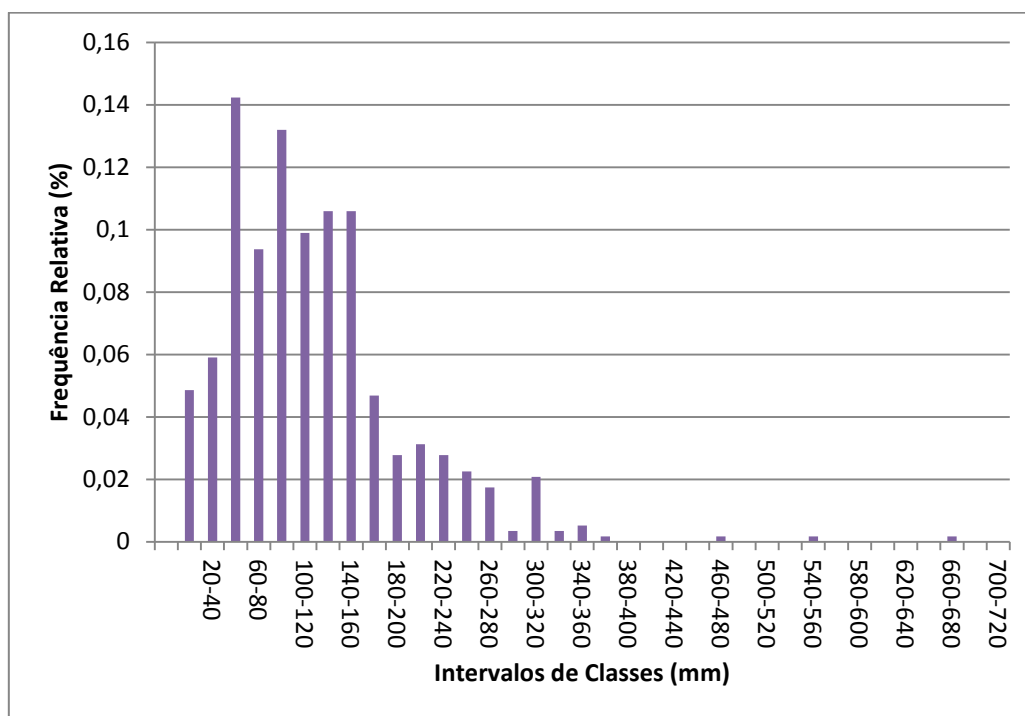


Figura 7 – Histograma de chuvas mensais obtidas pelo modelo RCA1 – 02 (Fonte: O Autor, 2014).

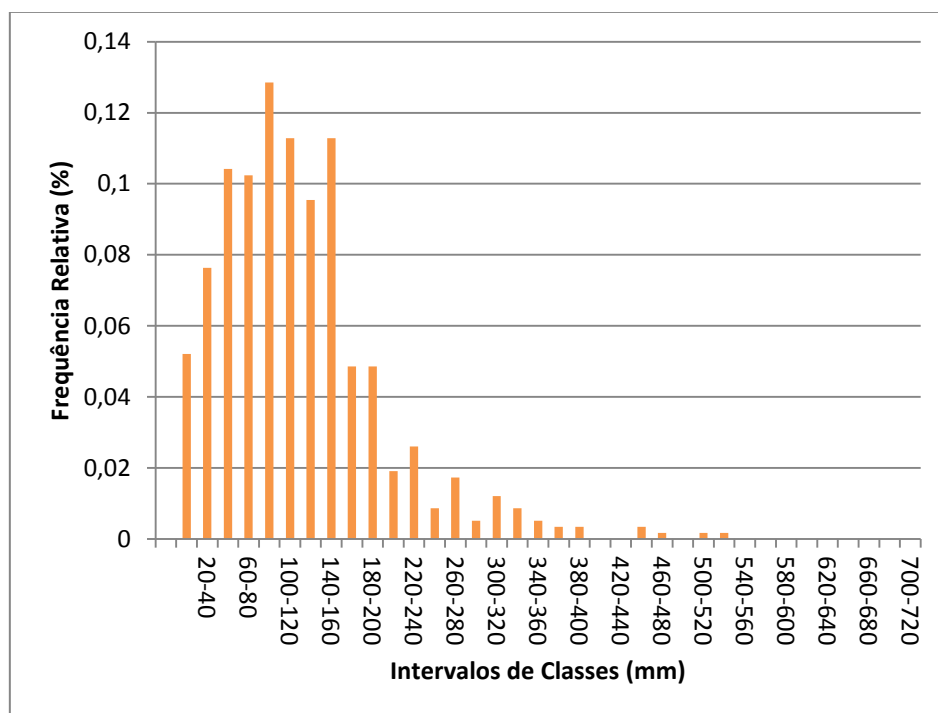


Figura 8 – Histograma de chuvas mensais obtidas pelo modelo RCA1 – 03 (Fonte: O Autor, 2014).



Analizando os histogramas gerados pelos três cenários de precipitação obtidos pelo modelo RCA1, Figura 6, Figura 7 e Figura 8 observa-se que as chuvas simuladas apresentam certa semelhança nos resultados. Porém não são constatados resultados positivos quanto à comparação destes com o histograma das chuvas observadas (Figura 3). O melhor resultado ocorreu com o cenário RCA1 – 01 (Figura 6).

Grande parte das chuvas situa-se no intervalo de até 180 mm nos três cenários gerados pelo modelo RCA1, de acordo com a Figura 6, Figura 7 e a Figura 8. As chuvas mais intensas compreendem os intervalos acima de 300 mm. Porém são observadas precipitações mensais superiores a 500 mm, mesmo que com poucas ocorrências. Isto não ocorre na realidade, ou seja, nas chuvas observadas.

Analizando os histogramas representados pela Figura 7 e Figura 8, é observado o mesmo comportamento das chuvas simuladas (RCA01 – 01) para os outros cenários (RCA01 – 02 e RCA01 – 03). Chuvas superiores a 300 mm não são tão frequentes, com as maiores chuvas ocorrendo em intervalos inferiores a 180 mm.

Apesar de ter sido gerada pelo mesmo modelo, o cenário representado pela Figura 6 possui um comportamento diferente em relação aos outros (Figura 7 e Figura 8), pois é o mais parecido em relação ao cenário das chuvas observadas. Sendo assim, pode-se realizar uma conclusão preliminar com a análise dos histogramas, de que as chuvas geradas pelo modelo ETA e RCA1 – 01 são as que melhor representam o regime de chuvas da estação pluviométrica Curitiba.

A partir dos histogramas, de acordo com o que foi proposto no item 2, foram construídos os polígonos de frequência. Os mesmos foram agrupados em um único gráfico para uma melhor visualização dos mesmos. A Figura 9 apresenta os polígonos de frequência para as séries de precipitações observadas confrontando com as séries obtidas pelos RCM.

Ao analisar a Figura 9 é visto que a curva gerada pelo modelo PROMES está diferente em relação às demais (não acompanha o polígono das chuvas observadas, representado pela cor preta). Isso ocorre devido ao fato das séries simuladas possuírem valores de precipitação muito acima dos que ocorrem na série hidrológica, mesmo realizando as correções de *bias*. Sendo assim, de

acordo com a análise dos polígonos de frequência, o único modelo que melhor representa de fato a chuva no local em estudo é o modelo ETA, pois é o que mostra o melhor ajuste da curva (Figura 9).

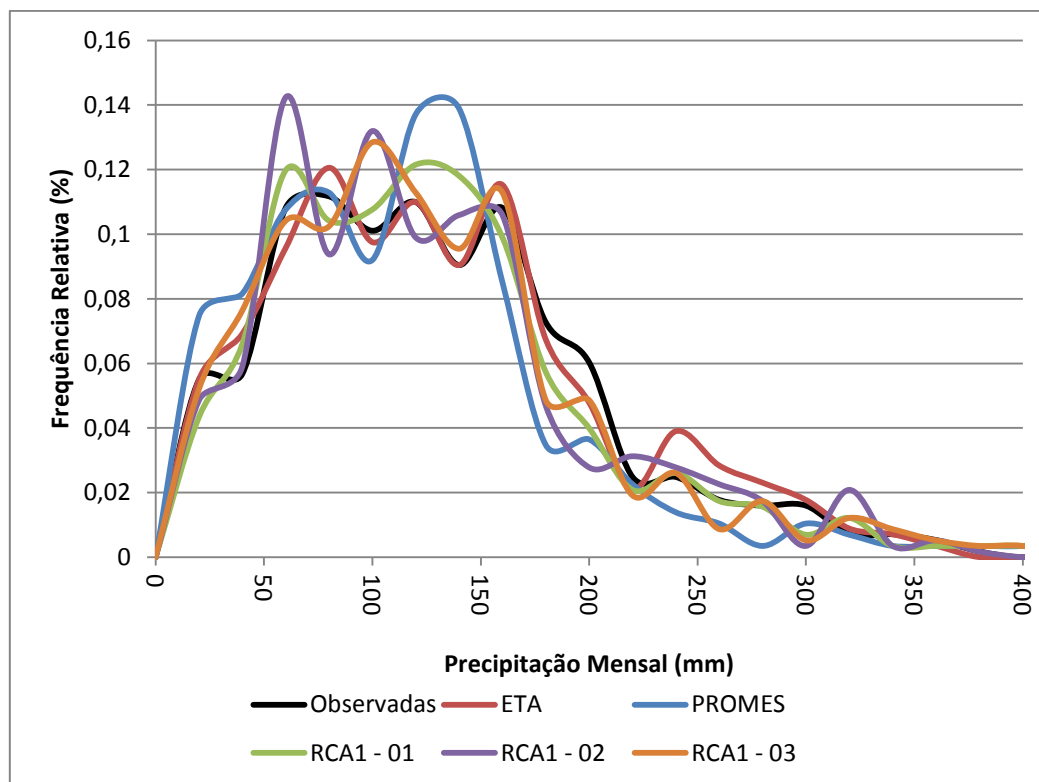


Figura 9 – Polígonos de frequência de todos os cenários e modelos (Fonte: O Autor, 2014).

Os três cenários do modelo RCA1 obtiveram resultados semelhantes, porém mais distantes em relação ao cenário dos registros observados na estação pluviométrica. Através desta análise preliminar, não observando os outros gráficos e indicadores, chega-se a uma conclusão prévia de que o modelo PROMES está superestimando as chuvas. Os três cenários do modelo RCA1 não estão acompanhando o polígono e nem atingindo os picos e depressões do mesmo. As simulações do modelo ETA se mostram como mais adequadas para a representação do cenário das chuvas observadas.

Com o intuito de analisar a correlação entre os dados observados e as simulações, foram construídos diagramas de dispersão. É visível que a correlação é pequena (quase nenhuma) entre as simulações e as chuvas observadas. Na Figura 10 é mostrada a correlação entre as simulações obtidas

pelo modelo ETA e as chuvas observadas e a reta de 45°. Quanto mais próxima da reta de 45°, melhor é a correlação entre os valores.

Também foi acrescentado um leque de probabilidades, ou seja, a chuva gerada pelos modelos mais ou menos 10%. Tal leque consiste na amplitude para 90% das chuvas observadas. As chuvas que se encontram dentro desta faixa de valores (leque de pontos) possuem uma probabilidade de serem mais correlacionados, ou seja, possuírem uma menor dispersão em relação aos demais.

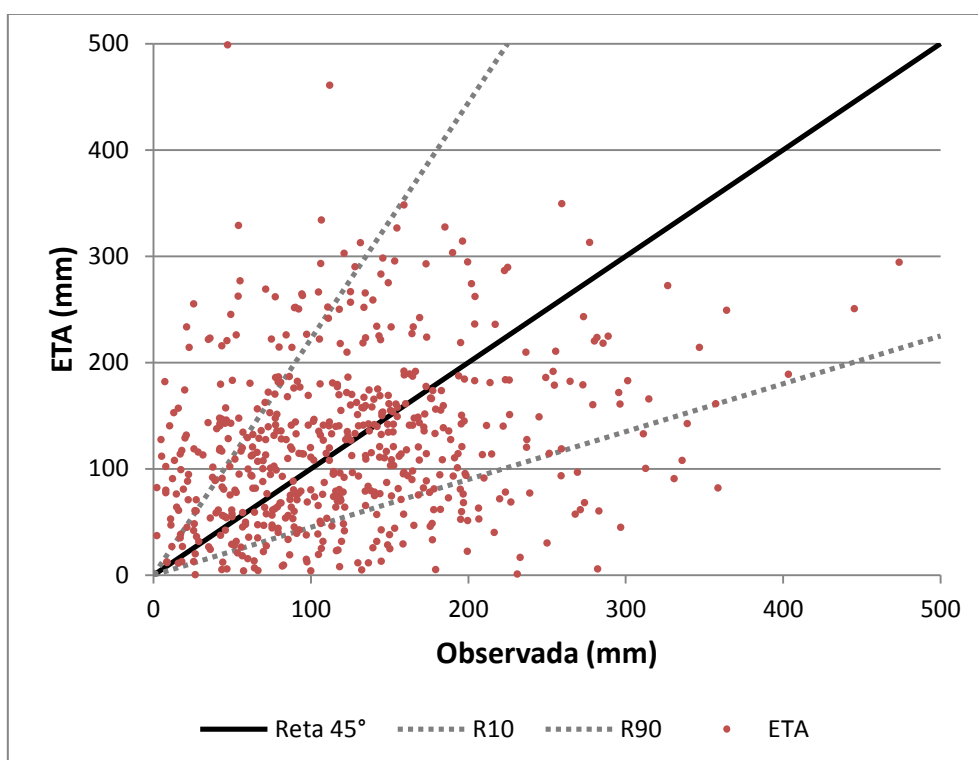


Figura 10 – Correlação de chuvas observadas *versus* modelo ETA (Fonte: O Autor, 2014).

Os demais gráficos de correlação estão nas próximas páginas (Figura 11, Figura 12, Figura 13 e Figura 14). Conforme é possível observar, o modelo PROMES apresentou a pior correlação em relação à reta de 45°, sobrepunhando os valores de chuva simulada em relação às observadas pela estação pluviométrica. No entanto, os outros modelos não apresentaram boas correlações em relação aos registros históricos da série hidrológica.

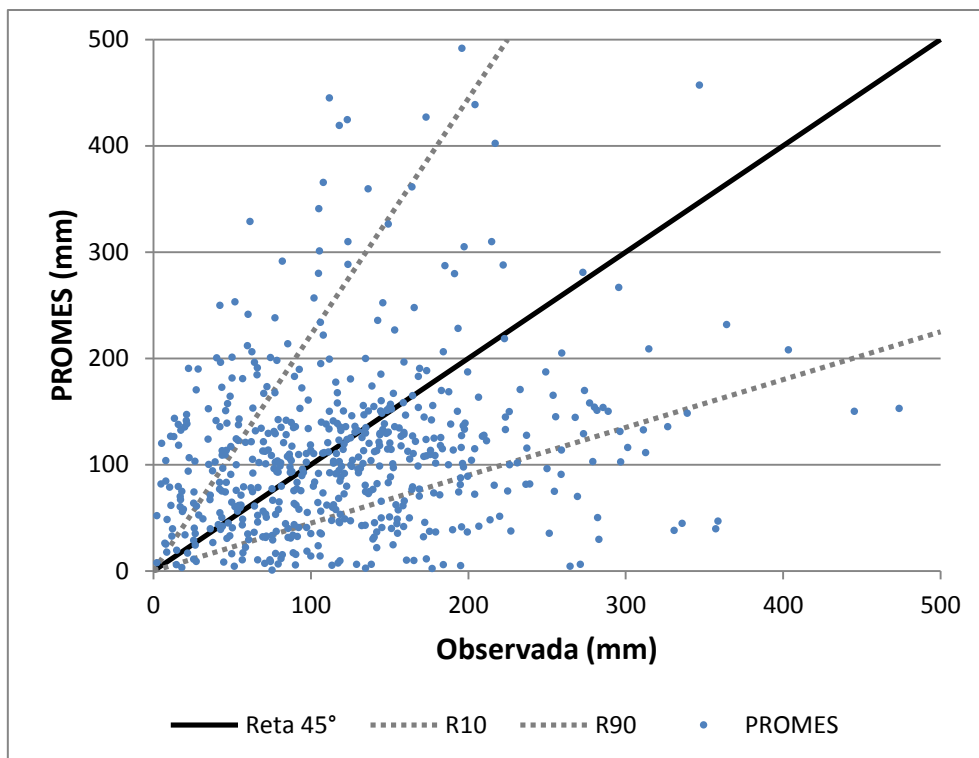


Figura 11 – Correlação de chuvas observadas *versus* modelo PROMES (Fonte: O Autor, 2014).

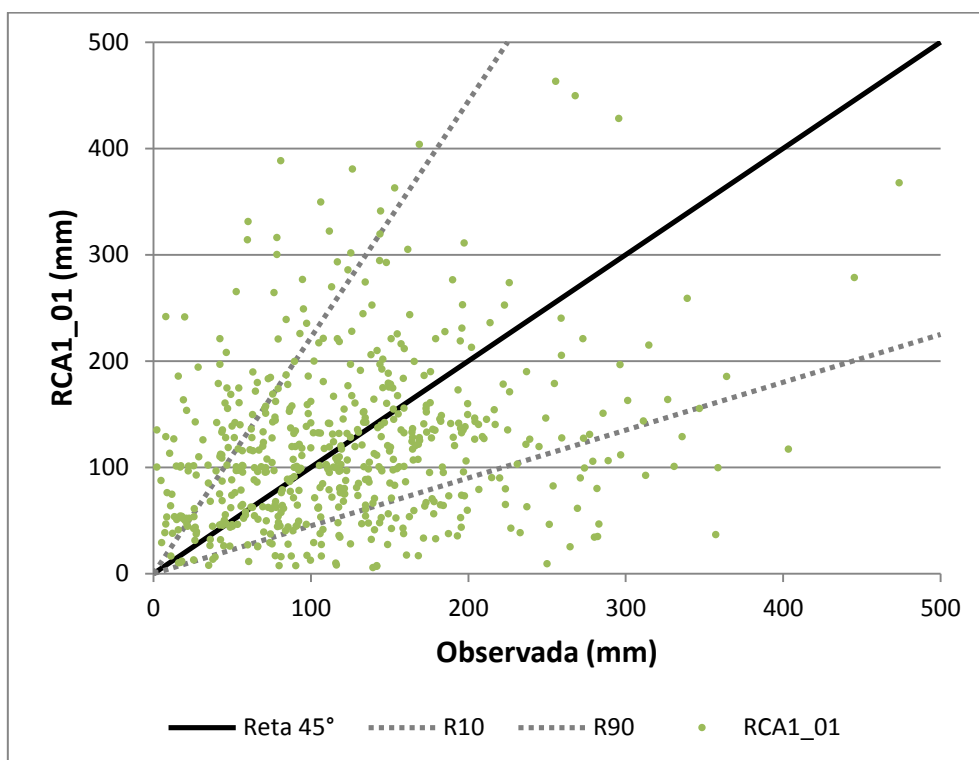


Figura 12 – Correlação de chuvas observadas *versus* modelo RCA1 – 01 (Fonte: O Autor, 2014).

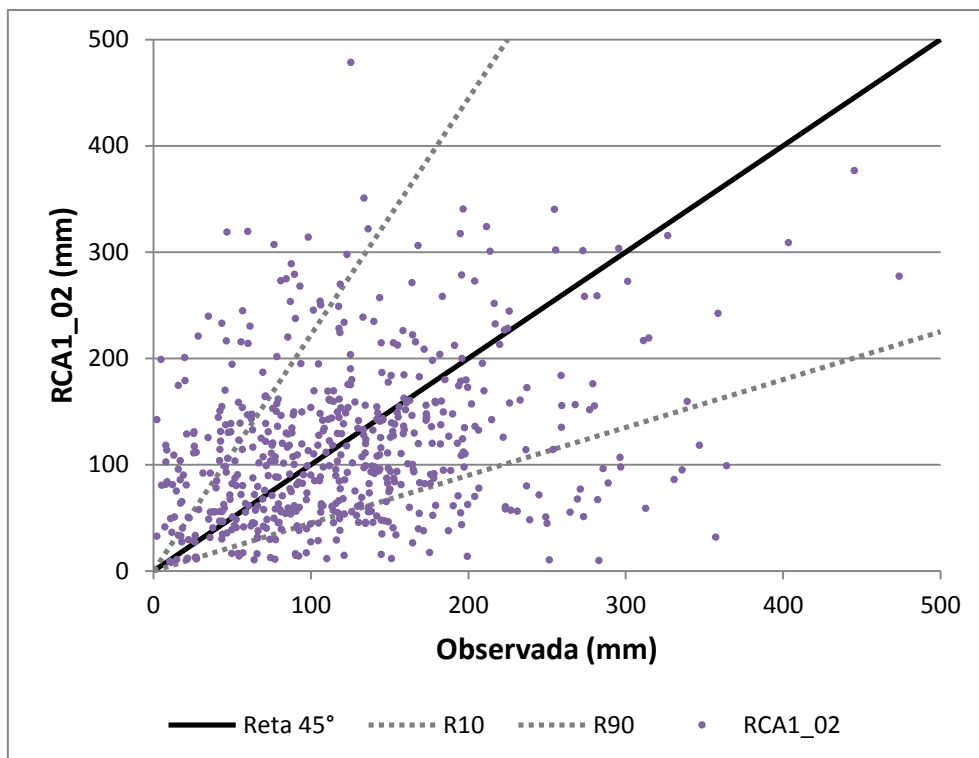


Figura 13 – Correlação de chuvas observadas *versus* modelo RCA1 – 02 (Fonte: O Autor, 2014).

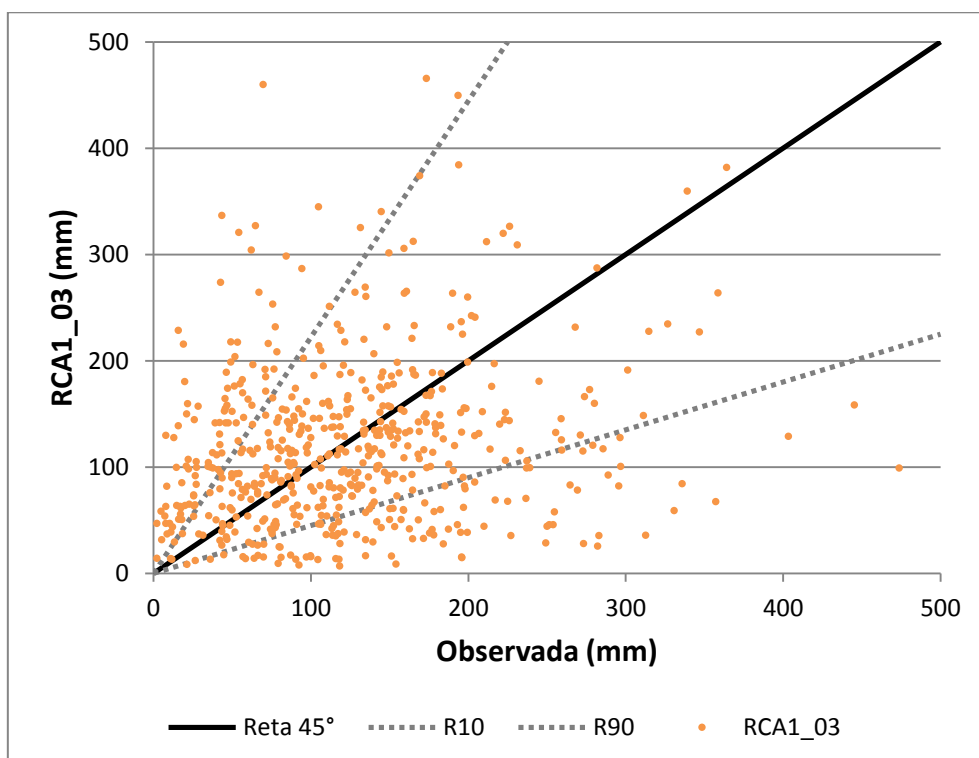


Figura 14 – Correlação de chuvas observadas *versus* modelo RCA1 – 03 (Fonte: O Autor, 2014).

Todos os cenários do modelo RCA1 apresentaram uma grande dispersão. O modelo ETA continua apresentando melhores resultados, bem como possui a menor dispersão "visual". Sendo assim, estes últimos gráficos apresentaram uma dispersão elevada e correlações nada satisfatórias para se chegar a alguma conclusão sobre a utilização dos cenários gerados por estes modelos hidrológicos. A maior parte dos pontos se encontra dentro da área de abrangência (leque de mais ou menos 10%).

A correlação entre as chuvas observadas e as obtidas por cada modelo foi calculada separadamente. Os resultados dos coeficientes de determinação  $R^2$  são mostrados na Tabela 3. Outros indicadores estatísticos foram calculados para a análise das chuvas mensais. Conforme é mostrado na Tabela 3, as estatísticas calculadas foram: média, mediana, desvio padrão, excesso de curtose, assimetria, RMSE e NS. A formulação destas estatísticas está mais bem detalhada no item 2.

Tabela 3 – Índices estatísticos das séries de precipitações mensais do período histórico (1961 – 2008) (Fonte: O Autor, 2014).

Estatísticas	OBS	ETA	PROMES	RCA1 - 01	RCA1 - 02	RCA1 - 03
N	564	576	576	576	576	576
Média	122,48	123,36	114,07	121,18	119,42	120,00
Mediana	114,35	114,09	103,36	107,56	106,44	107,62
$\sigma$	76,29	76,62	87,28	82,52	79,88	80,09
Ex. Curtose	1,48	1,24	11,83	8,29	6,28	3,70
Assimetria	1,00	0,91	2,51	2,02	1,73	1,52
Min	2,00	0,25	1,09	5,71	8,27	6,87
Max	473,80	498,71	833,36	685,61	669,90	531,97
NS	-	-0,51	-0,77	-0,67	-0,50	-0,63
RMSE	-	93,78	103,78	98,41	93,21	97,41
$R^2$	-	0,063	0,053	0,057	0,086	0,048

Analisando a Tabela 3, pode-se concluir que os resultados mais significativos apontam para o cenário do ETA e para o cenário RCA1 – 01. No cenário gerado pelo ETA, tanto a média, quanto a mediana entre as duas amostras foram muito parecidas, mesmo considerando um tamanho de amostra diferente N. Os outros indicadores como desvio padrão, excesso de curtose e assimetria resultaram em valores próximos entre as simulações do ETA e as chuvas observadas.

As simulações do modelo ETA não representaram bem as chuvas mínimas, mas representaram bem as máximas de cada ano. Os coeficientes NS, RMSE e  $R^2$  não foram satisfatórios em relação aos demais. O coeficiente de determinação foi ruim para todos os cenários, ficando próximo de zero, o que significa que os registros e as simulações praticamente não tem relação entre si.

A mesma análise foi vista visualmente pelos gráficos de dispersão apresentados anteriormente. Os outros indicadores estatísticos não foram satisfatórios quanto os que representam o modelo ETA. O modelo PROMES apresentou as piores estatísticas. Os resultados dos três cenários gerados pelo modelo RCA1 se mostraram próximos das chuvas observadas na estação pluviométrica, porém não tão satisfatórios quanto o ETA.

O valor das médias e medianas para os três cenários foram menores para os cenários gerados pelo RCA1. O desvio padrão foi muito parecido entre os três cenários, porém diferentes em relação ao obtido através das chuvas observadas. O excesso de curtose e o coeficiente de assimetria dos três cenários apresentaram resultados com maior discrepância em relação aos demais cenários gerados pelo ETA e PROMES. As mínimas não foram próximas da realidade e os valores máximos foram superestimados.

No entanto, a melhor correlação de todos os cenários obtidos foi a do RCA1 – 02. Porém, estes valores não são satisfatórios em termos de análise estatística, pois valores de NS e  $R^2$  próximos de zero ou inferiores, significam que não há correlação entre as simulações e os registros históricos. Conclui-se da análise dos índices estatísticos que o modelo ETA é o mais apropriado para representação das chuvas em Curitiba.

No caso das precipitações mensais, é melhor estimar o coeficiente de NS pela média. Valores muito próximos de zero, indicam uma coincidência temporal entre os dados observados e simulados, como é o caso do cenário gerado pelo ETA e o cenário RCA1 – 02.

Embora os índices sejam bastante parecidos entre a série do modelo ETA e a série observada para o período histórico (Tabela 3), a comparação de valores no mesmo mês mostra uma discrepância considerável (Figura 10). Esta particularidade suspeita-se que esteja vinculado a problemas de dependência

temporal e sazonal, o que não fica evidenciado pela análise da distribuição marginal.

Após a análise das estatísticas, foi realizado o estudo das frequências empíricas para as chuvas máximas e mínimas de cada ano, conforme mostrado na Figura 15 e na Figura 16, respectivamente.

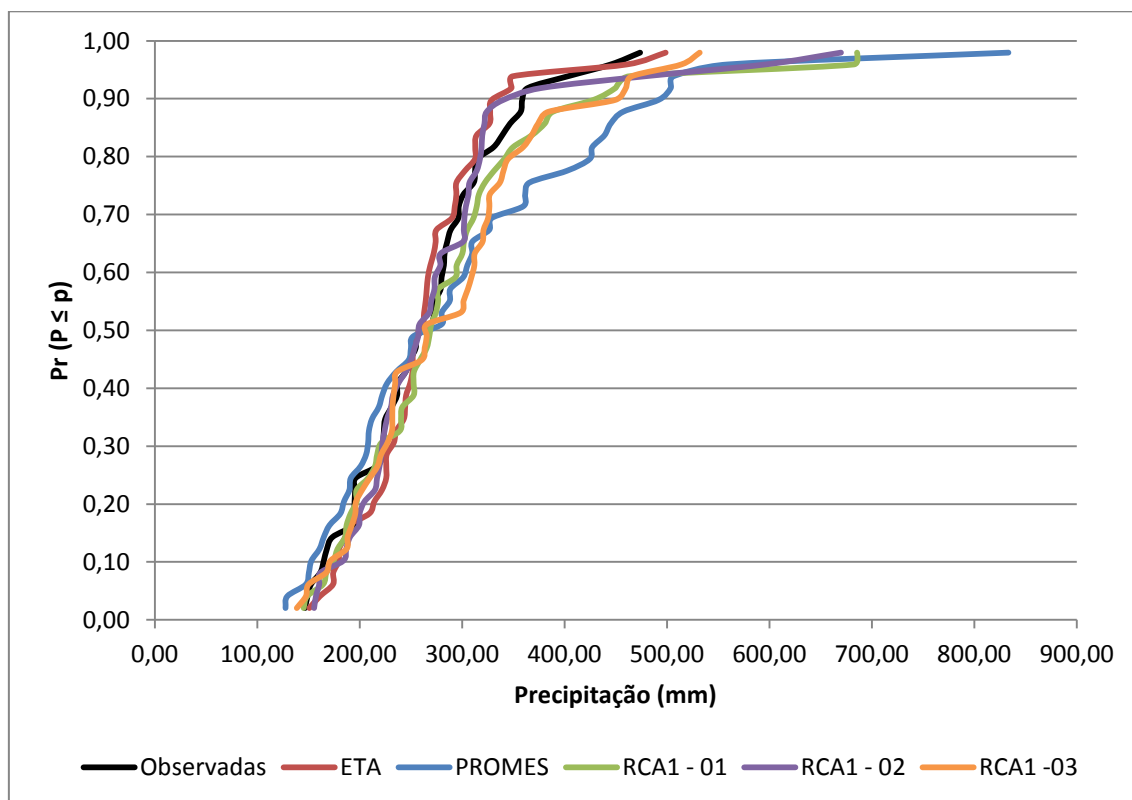


Figura 15 – Estudo das Frequências Empíricas Acumuladas das chuvas máximas mensais anuais de todas as séries (Fonte: O Autor, 2014).

É observado na Figura 15, que as chuvas máximas mensais de cada ano são mais bem representadas pelas simulações obtidas pelo modelo ETA, devido ao melhor ajuste das curvas. Os resultados das precipitações máximas mensais de cada ano para os cenários obtidos RCA1 – 01 e RCA1 – 03, não se mostraram bons. O modelo PROMES resultou em um desempenho ruim quanto a este estudo para as chuvas máximas mensais de cada ano. O cenário RCA1 – 02 mostrou um melhor ajuste para este estudo, tal qual o cenário gerado pelo ETA.

Os resultados da análise das frequências empíricas das chuvas mínimas mensais de cada ano apontaram resultados melhores para os três cenários gerados pelo RCA1. O modelo PROMES também não se mostra como



representativo para as chuvas mínimas mensais anuais, conforme é visto na próxima página, na Figura 16. Na mesma figura é visto que o cenário gerado pelo modelo ETA não apresenta um resultado satisfatório para as mínimas mensais de cada ano. Na mesma análise observa-se que tanto o ETA quanto o PROMES apresentam os piores resultados para o período histórico.

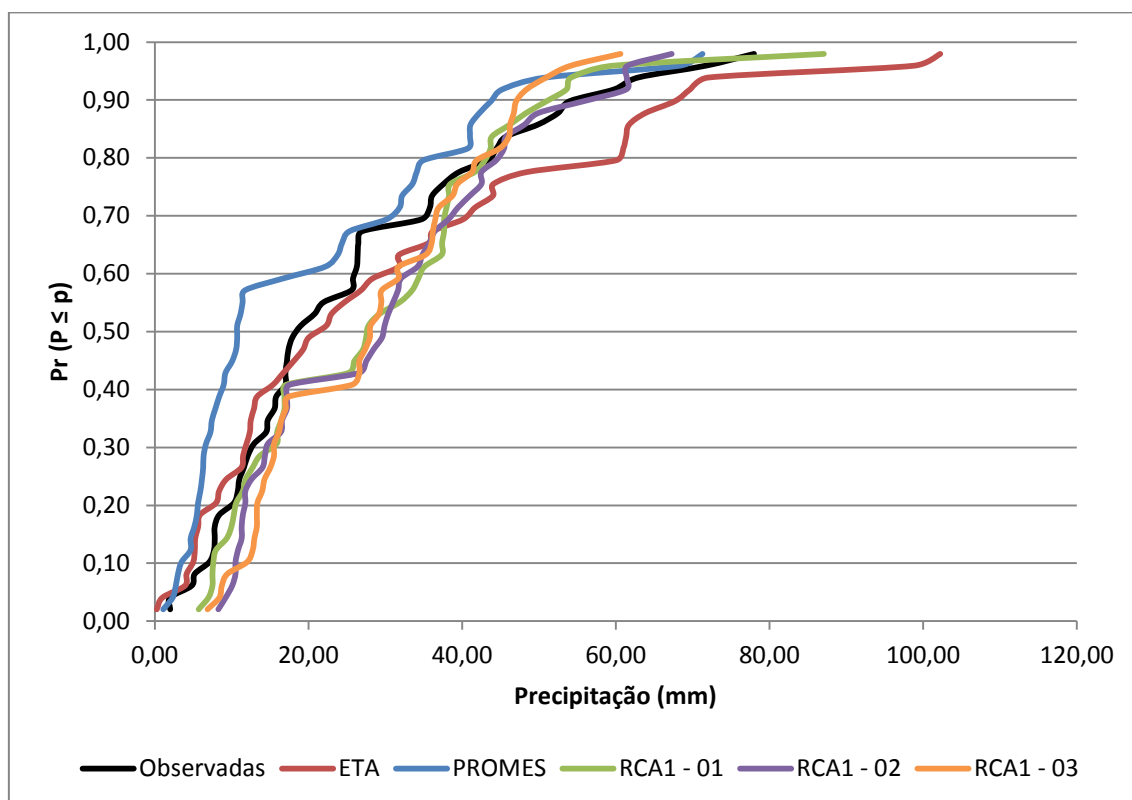


Figura 16 – Estudo das Frequências Empíricas Acumuladas das chuvas mínimas mensais anuais de todas as séries (Fonte: O Autor, 2014).

Com o intuito de finalizar os estudos de análise dos cenários obtidos por simulações de RCM, foi feita a curva de permanência das precipitações. O período considerado para a construção da mesma foi o período em comum das séries observadas com as simuladas (período histórico). As curvas de permanência foram construídas, conforme a descrição apresentada no item 2.

A Figura 17 apresenta a curva de permanência para todas as precipitações, observadas e simuladas pelos RCM. Através da análise das curvas, é possível concluir que o modelo PROMES não representa a série histórica observada. As precipitações dos três diferentes cenários para o modelo RCA1 mostraram-se satisfatórias.

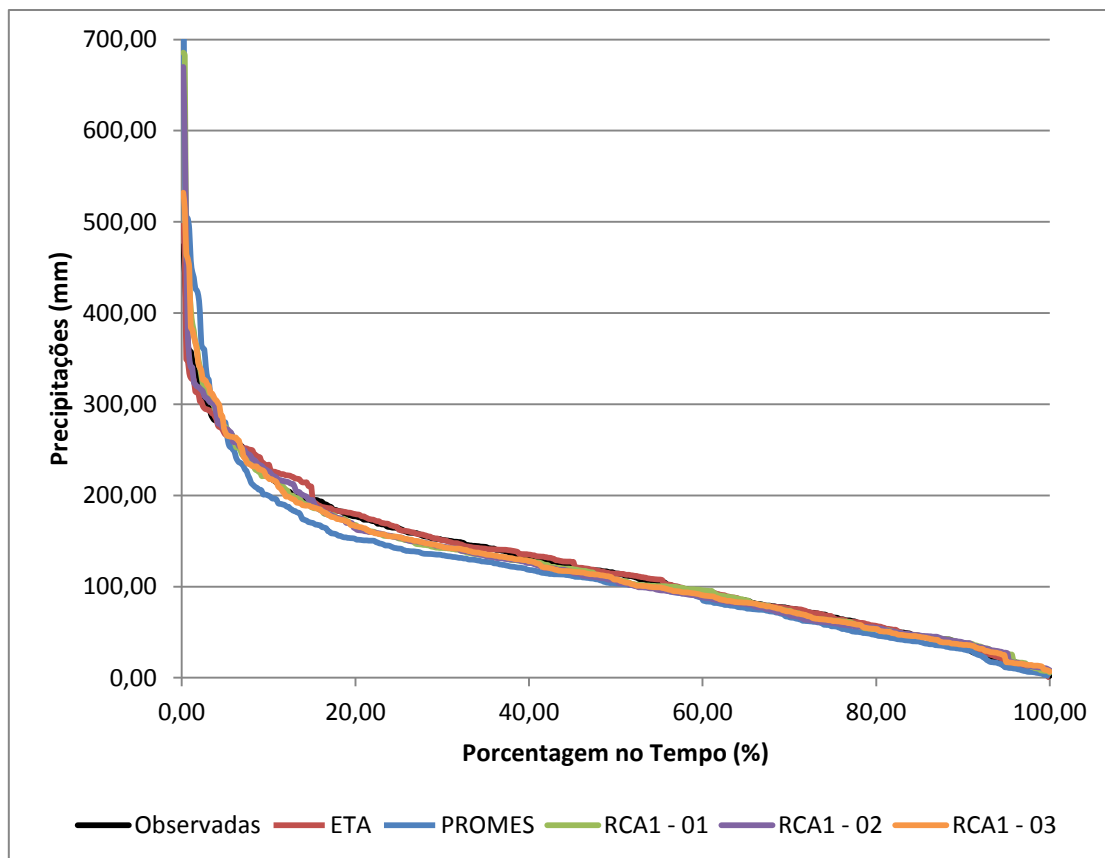


Figura 17 – Curvas de Permanência de todos os cenários (Fonte: O Autor, 2014).

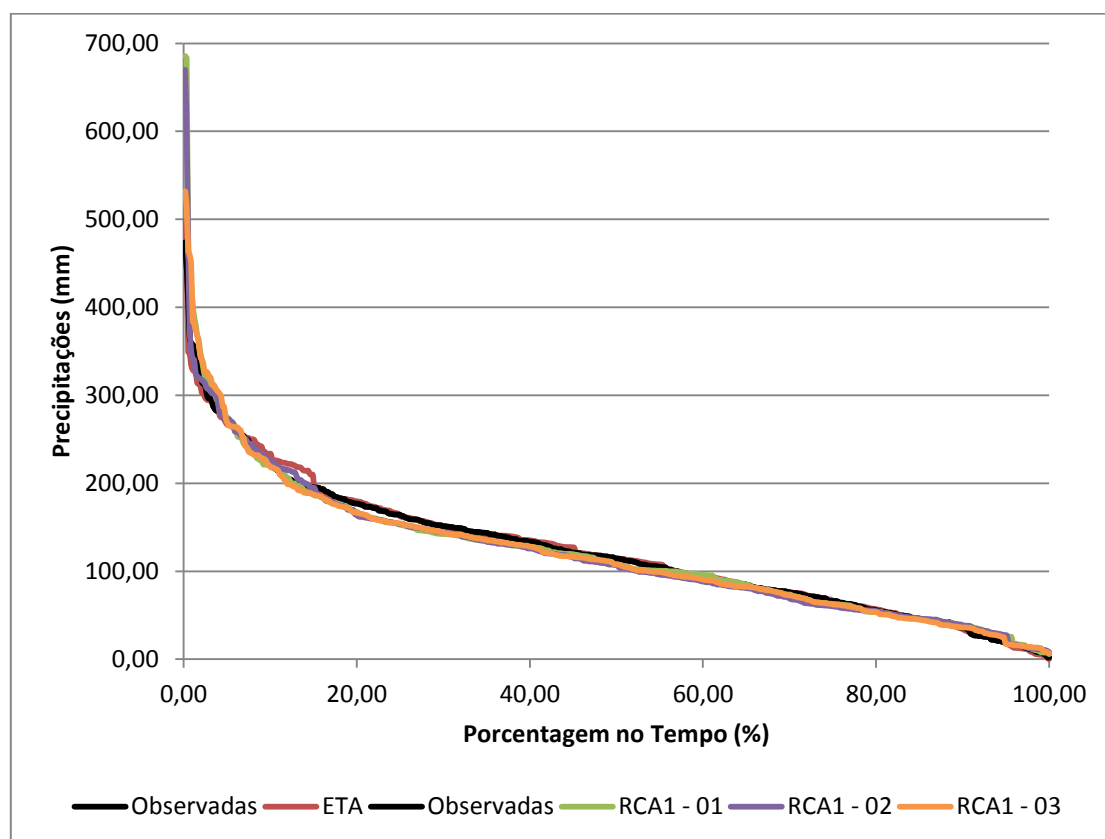


Figura 18 – Curvas de Permanência dos cenários mais apropriados (Fonte: O Autor, 2014).

O modelo ETA foi o mais bem representativo, seguido do RCA1 (diferentes cenários), conseguindo acertar as precipitações em sua maioria, tendo um aspecto muito semelhante à curva de permanência das chuvas observadas na estação Curitiba. Na Figura 18, apenas não foi apresentada a curva de permanência gerada pelo PROMES. Os quatro cenários mostram o bom ajuste da série simulada para o período histórico.

#### 4.1.3. Resultados obtidos no Período Histórico

De acordo com os resultados obtidos através da EDA no período histórico, é possível concluir que o modelo ETA é o que melhor representa as chuvas da região. Entre os cenários diferentes gerados pelo modelo RCA1, não foi possível concluir qual deles possui uma melhor representação frente à série hidrológica. O modelo PROMES logo foi descartado dos estudos, pois não apresentou resultados positivos.

Os cenários gerados pelo modelo RCA1 também foram descartados, visto os resultados do modelo ETA. A EDA apresentou os melhores resultados para o cenário gerado por este modelo. As estatísticas básicas e os coeficientes calculados, tais como o NS, RMSE e  $R^2$ , também foram importantes para a tomada de decisão de qual RCM é o mais representativo para geração de séries de precipitação para Curitiba.

Além disso, o modelo ETA é amplamente utilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Sendo assim, com base nos resultados obtidos da utilização dos RCM descritos anteriormente, as análises seguintes são realizadas utilizando apenas o cenário do modelo ETA. Cabe ressaltar que a próxima análise foi dividida em dois cenários diferentes, sendo o ETA01 (período histórico) e o ETA02 (período futuro) da série simulada por este modelo.

#### 4.2. Resumo do Capítulo

Neste capítulo foi realizada uma análise inicial dos registros históricos observados e dos cenários de precipitação gerados pelos RCM. Inicialmente foram identificados os períodos com falhas e estes foram eliminados dos

estudos. Na sequência, os dados gerados pelos RCM foram submetidos a uma correção de *bias*, tal qual descrito no item 2.

Na sequência foi aplicada a EDA para verificar o potencial dos modelos em reproduzir o período histórico. Tal análise ocorreu observando histogramas, diagramas de dispersão, análise de indicadores estatísticos, estudo das Frequências Empíricas Acumuladas e curvas de permanências.

Finalmente, foi identificado que o modelo ETA é o mais representativo para as chuvas da região. Os cenários gerados pelo modelo RCA1 se mostraram satisfatórios em algumas análises, porém não foi tão conclusiva quanto à análise do cenário gerado pelo ETA.

## 5. Análises dos Cenários de Precipitação

### 5.1. Análise Anual

O cenário de precipitação gerado pelo modelo ETA, nesta etapa foi dividido em dois cenários de precipitação, sendo um deles representando o período passado (ETA01) e outro o período futuro (ETA02). As chuvas observadas na estação pluviométrica Curitiba foram representadas por OBS.

Neste item são descritas a análise das chuvas anuais pelos três cenários: OBS, ETA01 e ETA02. É realizada primeiramente a EDA e na sequência a aplicação dos testes estatísticos descritos no item 2, com o intuito de verificar se estão ocorrendo tendências nas séries geradas pelos modelos e na série hidrológica.

Conforme visto no capítulo anterior como parte da EDA, foram identificadas falhas nas séries de OBS e ETA01. O período em comum entre o ETA01 e OBS compreende desde janeiro de 1961 a dezembro de 2008, com poucas falhas nas observações de chuva da estação pluviométrica. A mesma possui registros de precipitações até março de 2013.

Devido à presença de falhas no cenário ETA01, procurou-se limitar o período em comum aos dois cenários (ETA01 e OBS) em dezembro de 2008. Estas falhas correspondem a um período de 24 meses. O período futuro representado por ETA02 compreende o intervalo de janeiro de 2012 a novembro de 2099.

Como análise inicial das chuvas anuais, foram calculadas as estatísticas descritivas das precipitações nos três cenários: OBS, ETA01 e ETA02. Na Tabela 4 são apresentadas estas estatísticas dos totais anuais precipitados. Esta tabela contém as estatísticas descritivas dos totais anuais precipitados, diferente da Tabela 3, onde estão as estatísticas descritivas dos totais mensais precipitados.

De acordo com a Tabela 4, o número de observações ( $N$ ) das chuvas observadas é praticamente igual tanto para OBS, quanto para ETA01, apesar de a série histórica possuir registros desde 1889. Para comparar os dois

cenários que representam o passado, procurou-se realizar as análises somente no período em comum entre estas duas séries (1961 – 2008).

Da comparação de ETA01 com OBS, é visto que as médias anuais possuem praticamente o mesmo valor, as medianas possuem valores próximos, assim como os desvios padrão, representados por  $s$ .

Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos totais anuais precipitados (Fonte: O Autor, 2014).

Estatísticas	OBS	ETA01	ETA02
N	43	48	88
Média	1467,19	1480,30	1789,49
Mediana	1473,70	1434,95	1780,11
$\sigma$	294,24	287,97	370,52
Ex. Curtose	-0,17	1,93	-0,38
Assimetria	-0,10	1,05	0,22
Min	765,50	994,99	950,49
Max	2071,20	2497,80	2603,94

O excesso curtose é mais sensível em relação à aglomeração dos pontos em torno da média. O coeficiente de assimetria mostrou uma variação maior, isto pode ter ocorrido devido ao tamanho da amostra (número de observações) do ETA01 ser maior que ao tamanho da amostra das chuvas observadas, conforme visto na Tabela 4.

As chuvas mínimas não foram bem representadas. No entanto, houve uma diferença de 17,1% entre as chuvas máximas dos cenários OBS e ETA01, neste último cenário houve um acréscimo de 17,1% nas chuvas máximas anuais. Na comparação das estatísticas dos cenários OBS e ETA01 ficou evidente que as chuvas do cenário ETA01 apresentam mínimas e máximas superiores aos valores observados pela estação pluviométrica, de acordo com a Tabela 4.

Para o cenário ETA02, é realizada outra análise por se tratar de um período distinto ao período observado e consequentemente, distinto ao ETA01. O número de registros desde janeiro de 2012 até novembro de 2099 é de 88 anos. É visto que em relação às duas colunas, referentes ao ETA01 e ETA02, houve um acréscimo em três indicadores estatísticos: média, mediana e desvio

padrão. Leva a crer que podem estar ocorrendo tendências de acréscimo de chuvas para a região.

Tanto os valores mínimos, quanto os valores máximos, observa-se uma aproximação das chuvas do ETA01 e ETA02, provavelmente por terem sido geradas pelo mesmo modelo. O valor máximo do ETA02 indica que podem estar ocorrendo ligeiras tendências de aumento das precipitações anuais máximas em Curitiba, conforme visto na Tabela 4.

Com o intuito de dar continuidade nas análises estatísticas, na sequência estão apresentados os gráficos de EDA com o objetivo de auxiliar na análise das chuvas e identificar visualmente possíveis tendências ou mudanças abruptas nas séries. Foram elaborados gráficos temporais de média e mediana móveis de 10 anos. Também foram elaborados gráficos utilizando a regressão LOWESS e a regressão linear, descritas no item 2.

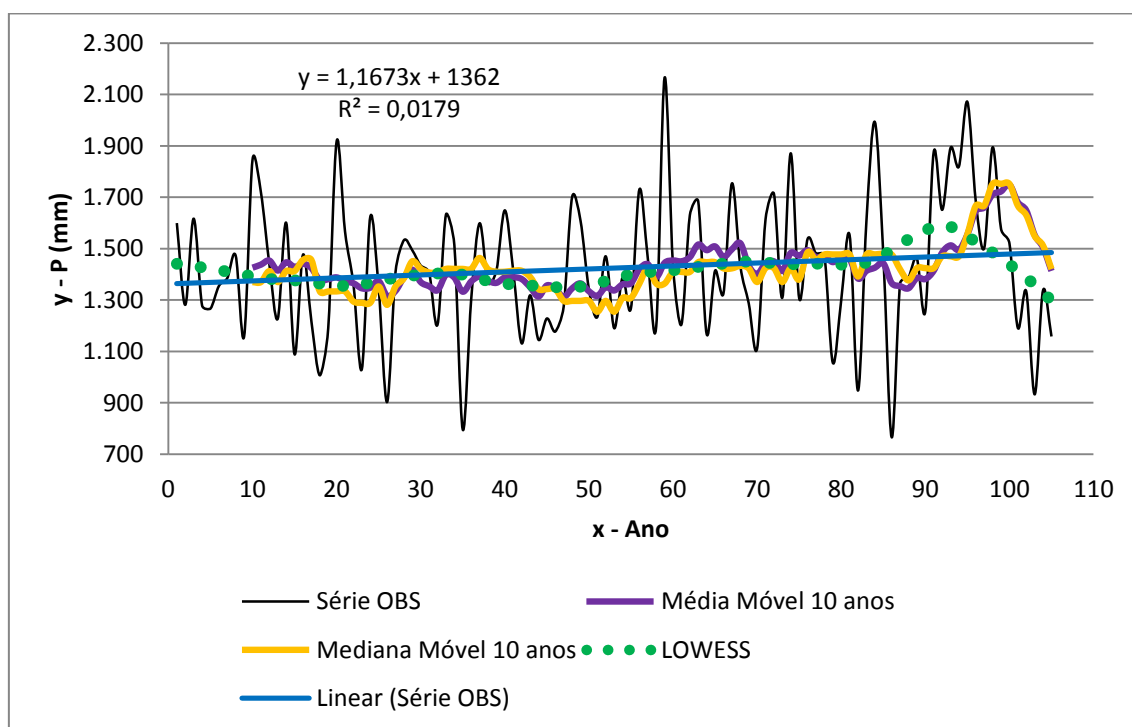


Figura 19 – Gráficos dos totais anuais precipitados para OBS (Fonte: O Autor, 2014).

Também foram construídos gráficos dos totais acumulados para o ETA01 e ETA02, conforme é visto na Figura 20 e Figura 21. Foram utilizadas as mesmas técnicas que as empregadas na Figura 19.

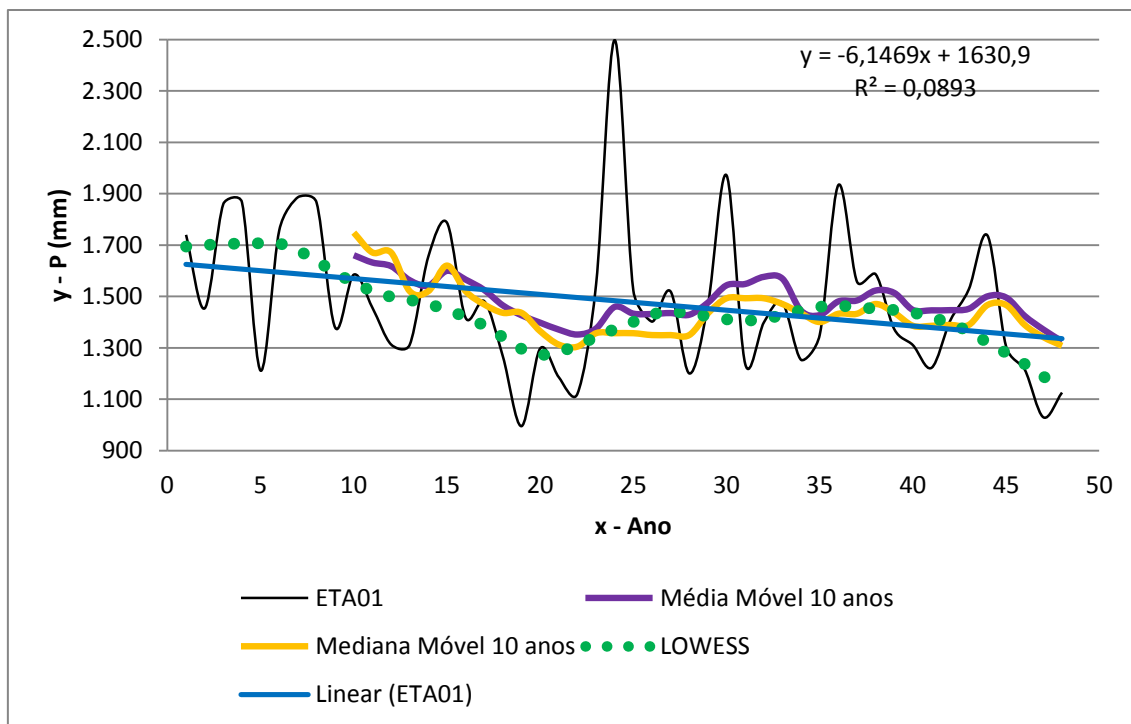


Figura 20 – Gráficos dos totais anuais precipitados para o ETA01 (Fonte: O Autor, 2014).

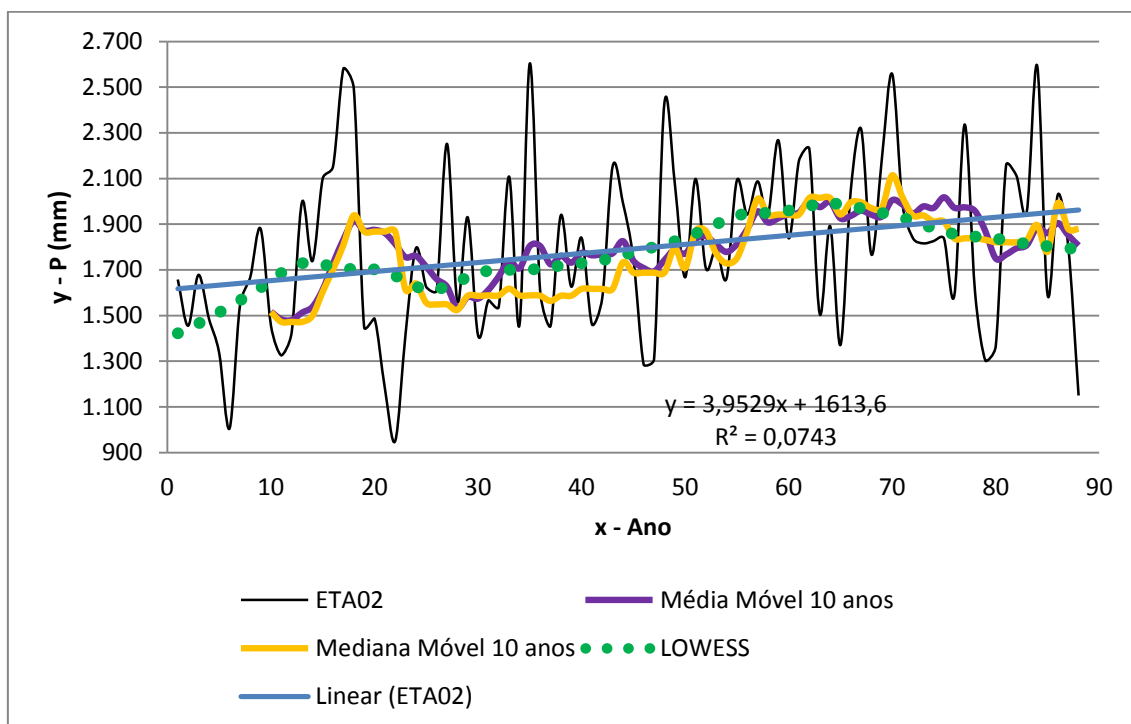


Figura 21 – Gráficos dos totais anuais precipitados para o ETA02 (Fonte: O Autor, 2014).

Conforme é visto na Figura 19, em toda a série histórica da estação Curitiba, de acordo com a reta de regressão linear, há uma tendência



ligeiramente positiva desde o início da série em 1889 (representado pelo ano 1 no gráfico) até o último ano analisado, 2008 (representado pelo ano 105 no gráfico). Tal tendência pode ser vista também pelo coeficiente angular da reta de regressão linear (sinal positivo). A regressão LOWESS também apresentou uma ligeira tendência positiva ao final da série hidrológica, assim como as funções suavizadoras de média e mediana móveis de 10 anos.

De acordo com a Figura 20 é percebido que no ETA01 ocorre uma tendência negativa. Tal constatação se deu para as técnicas que constam na legenda da Figura 20, observando-se uma tendência de decréscimo no período. O coeficiente angular da reta de regressão linear também apresentou uma tendência decrescente (sinal negativo). As retas de regressão linear foram ajustadas pela linha de tendência, presente no *software* EXCEL.

Observando a Figura 21, pode-se concluir que as chuvas que contemplam o ETA02 possuem uma tendência positiva, analisando visualmente as técnicas empregadas e também observado o coeficiente angular de regressão linear (sinal positivo). As funções suavizadoras de média e mediana móveis também apontam para uma tendência ligeiramente positiva, assim como a regressão LOWESS.

As equações de regressão dos totais anuais precipitados estão na Tabela 5 e também o coeficiente de determinação obtido para cada cenário. De acordo com as equações, é visto que o coeficiente angular das retas de regressão é positivo nos cenários OBS e ETA02. O coeficiente angular da reta de OBS é baixo, porém positivo, indicando *a priori* que ocorrem tendências de acréscimo nas chuvas da série histórica.

Tabela 5 – Equações de regressão linear para os totais anuais precipitados (Fonte: O Autor, 2014).

Equações de Regressão Linear	OBS	ETA01	ETA02
	$y = 1,1673x + 1362$	$y = -6,1469x + 1630,9$	$y = 3,9529x + 1613,6$
R <sup>2</sup>	0,0179	0,0893	0,0743

Uma tendência de aumento de chuvas no decorrer da série ETA02, é percebida, pois possui um coeficiente angular significativo. No entanto, o

coeficiente angular da reta ETA01 é negativo, indicando que as chuvas estão reduzindo neste cenário para o período considerado. A tendência negativa observada em ETA01 contraria o que ocorreu na série histórica.

Conforme o relatório do IPCC (2013), também é visto que estão ocorrendo tendências de acréscimo para o futuro (nesta dissertação, representado pelo cenário ETA02). Na sequência foi aplicado o teste do coeficiente de regressão linear para as séries de precipitação dos três cenários (OBS, ETA01 e ETA02), com o intuito de identificar a significância das tendências. Conforme descrito em SHARMA *et al.* (2000), este teste foi aplicado e comparado com o valor crítico obtido das tabelas de t de Student para os graus de liberdade, conforme descrito no item 2.

A hipótese nula, dado um nível de significância  $\alpha = 5\%$  é de que  $H_0: b = 0$ , sendo  $b$  o coeficiente angular da reta de regressão linear (amplamente descrito no item 2). Assim, os resultados dos testes de hipótese são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultado do teste de hipótese do coeficiente angular da reta de regressão linear (Fonte: O Autor, 2014).

Cenário	t	t (tab.)	Resultado	Tendência
OBS	1,3701	1,9850	Aceita H0	Não
ETA01	2,1238	2,0195	Rejeita H0	Sim
ETA02	2,6273	1,9883	Rejeita H0	Sim

Segundo os resultados apresentados na Tabela 6, são verificadas tendências nas séries de ETA01 e ETA02. Da análise do sinal do coeficiente angular e do teste aplicado ao valor deste, é visto que ocorre tendência de acréscimo (positiva) em ETA02, enquanto que em ETA01 ocorre tendência de decréscimo (negativa).

O resultado do teste do coeficiente angular da reta de regressão do cenário OBS não indicou presença de tendência significativa nas chuvas observadas. Sendo assim, são confirmadas tendências para o ETA01 e ETA02, utilizando tanto a análise visual, quanto a análise estatística.

Prosseguindo com a EDA, foram elaborados gráficos utilizando o método RAPS, conforme descrito no item 2. O RAPS (Figura 22) foi aplicado

com a intenção de identificar possíveis tendências tanto na série hidrológica, quanto nas séries dos cenários ETA01 (Figura 23) e ETA02 (Figura 24).

Conforme é possível verificar nos gráficos RAPS, assim como nas outras figuras, os anos seguiram uma equivalência. Para o cenário das chuvas observadas, o ano de 1889 representa o ano 1 do gráfico e as falhas foram desconsideradas. No cenário ETA01, o ano de 1961 também é representado pelo ano 1 assim como o ano 2012 no cenário ETA02. A tabela com os anos e suas equivalências encontra-se na sequência após a análise dos gráficos RAPS. Tais equivalências se encontram no texto entre parêntesis logo após o ano.

Dos gráficos RAPS, se observa na Figura 22 que a série histórica apresenta uma alteração brusca na série (ponto de alteração de declividade e possível alteração na média) no ano de 1952 (54) (vale), seguido de uma alteração suave (vale) na declividade do gráfico RAPS no ano de 1992 (90). Na sequência é observada uma alteração brusca na declividade da média em meados de 2002 (99) (pico).

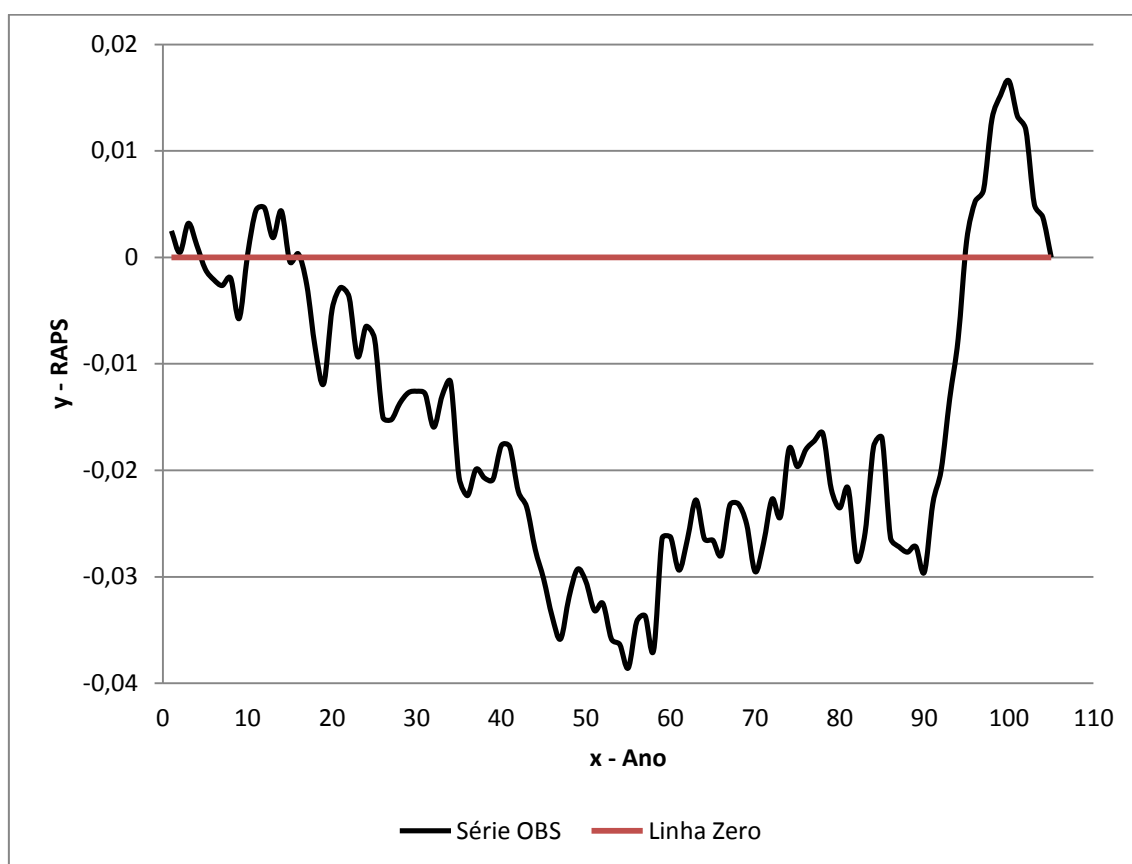


Figura 22 – RAPS dos totais anuais precipitados em OBS (Fonte: O Autor, 2014).

Da análise da Figura 23, uma alteração brusca na série é observada em meados de 1982 (22) (vale), seguida de alterações crescentes até o ano de 1995 (35). Neste ano são constatadas pequenas oscilações nas declividades do gráfico RAPS até 2005 (42). Na Figura 24, que corresponde ao ETA02 (série futura), também se observam alterações na média, devido às mudanças bruscas no gráfico RAPS.

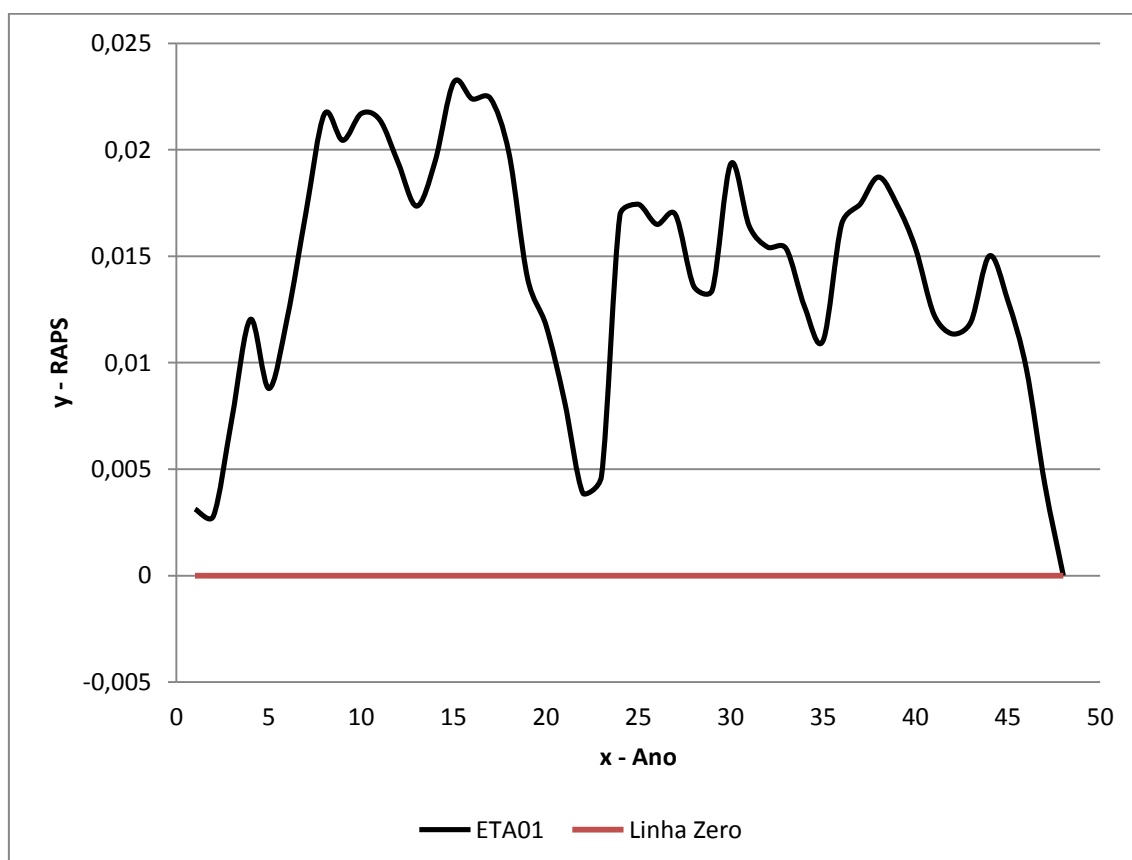


Figura 23 – RAPS dos totais anuais precipitados em ETA01 (Fonte: O Autor, 2014).

Tais alterações são percebidas em meados de 2023 (12), seguido de uma alteração brusca por volta de 2028 (17), Figura 24. Outra alteração brusca é percebida em 2058 (47), ano onde a partir deste, a série simulada tem poucas alterações bruscas (apenas em 2091, ou 80) até em aproximadamente 2095 (84), ao final da série. Tais mudanças não comprovam a existência de alterações nas médias, mas alertam que tais características sejam comprovadas através da aplicação de testes estatísticos. Estes testes possibilitam analisar o grau de significância destas alterações.

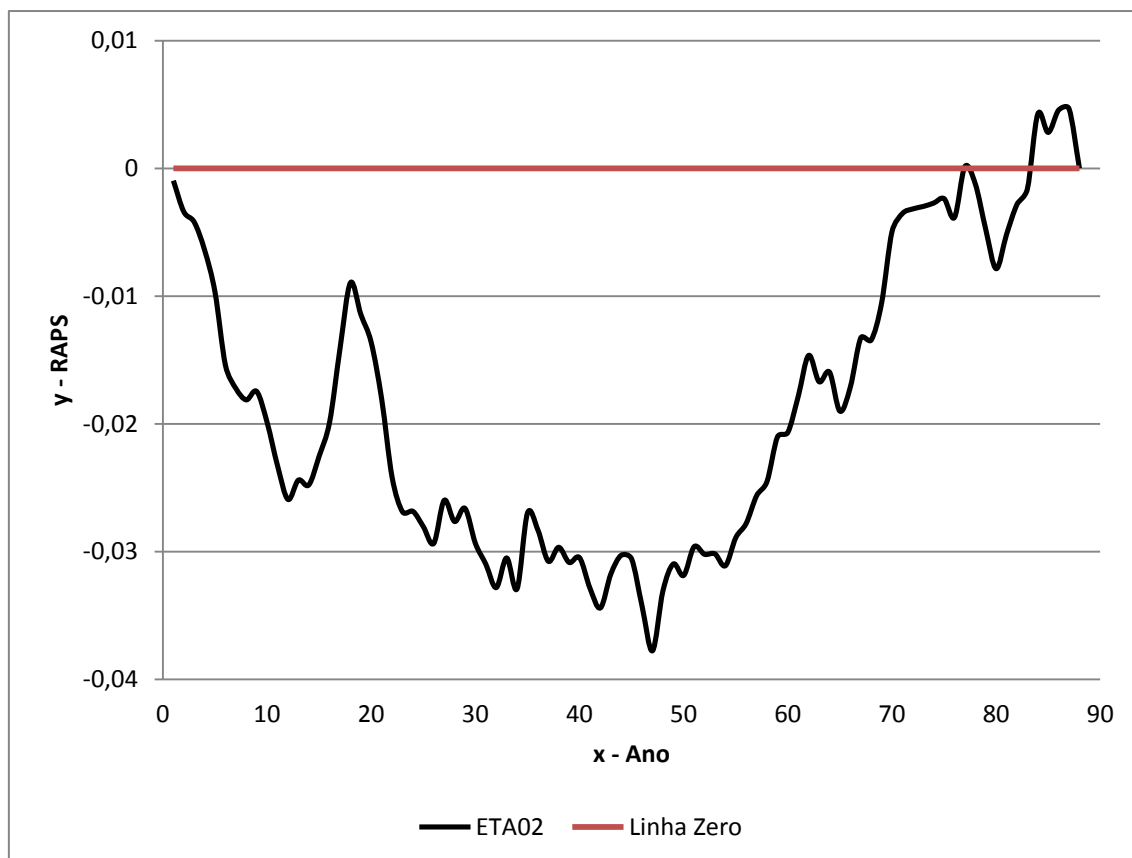


Figura 24 – RAPS dos totais anuais precipitados em ETA02 (Fonte: O Autor, 2014).

Outra consideração interessante a ser realizada através da análise dos gráficos RAPS (Figura 22, Figura 23 e Figura 24) é a relação destes com o coeficiente da reta de regressão linear. Onde este foi negativo (Figura 23), o gráfico RAPS teve desvios acima da linha zero em relação aos demais com o coeficiente positivo (Figura 22 e Figura 24), onde os desvios foram geralmente abaixo da linha zero. Isto indica que nas diferenças acima da linha zero, ocorrem tendências negativas, conforme ALEMAW e CHAOKA (2002).

Com a intenção de consolidar os resultados do método RAPS, foi elaborado um gráfico com os totais anuais acumulados ao longo de cada série histórica. Este gráfico permite analisar o ponto onde ocorrem alterações na série, através da análise visual da reta (ponto onde o coeficiente angular é alterado). A curva acumulada em função do tempo é representada pela Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28 para o OBS, ETA01, ETA02 e todos juntos, respectivamente. Tal análise é sugerida por FILL (2011) e BATISTA *et al.* (2009).

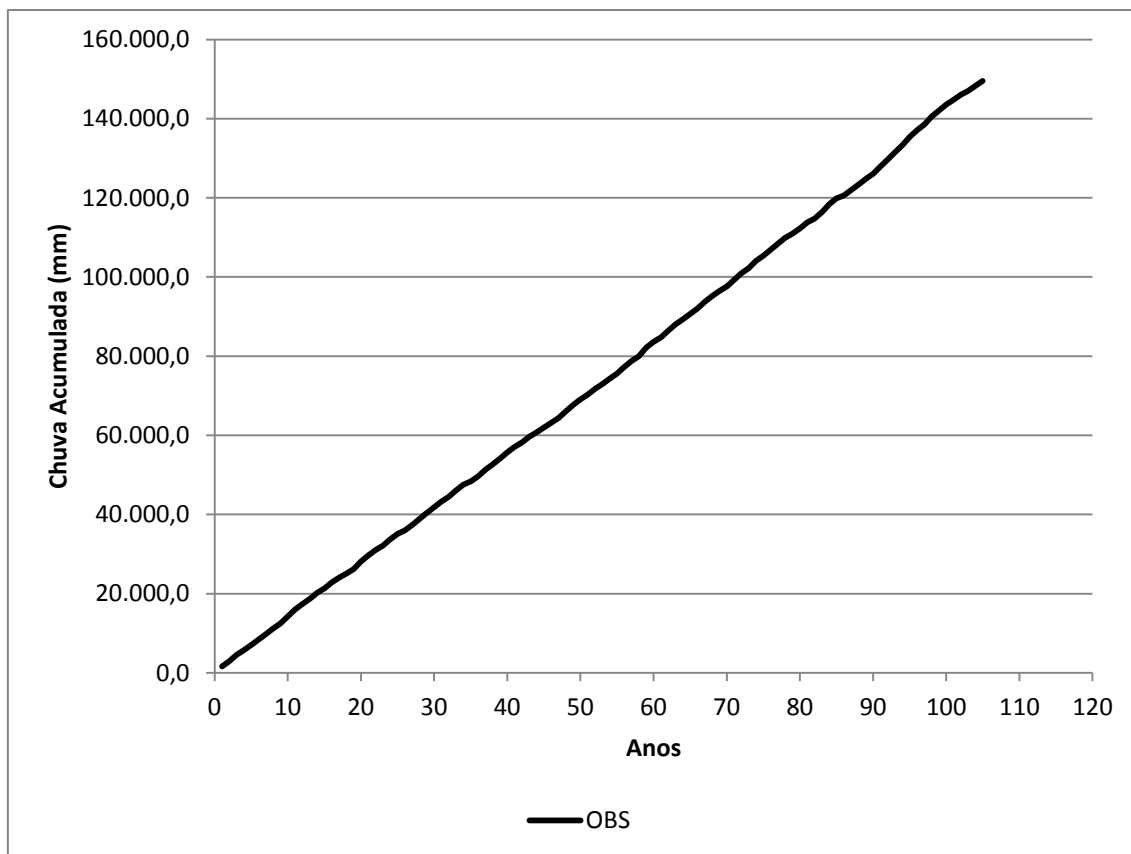


Figura 25 – Curva de totais anuais precipitados acumulados em OBS (Fonte: O Autor, 2014).

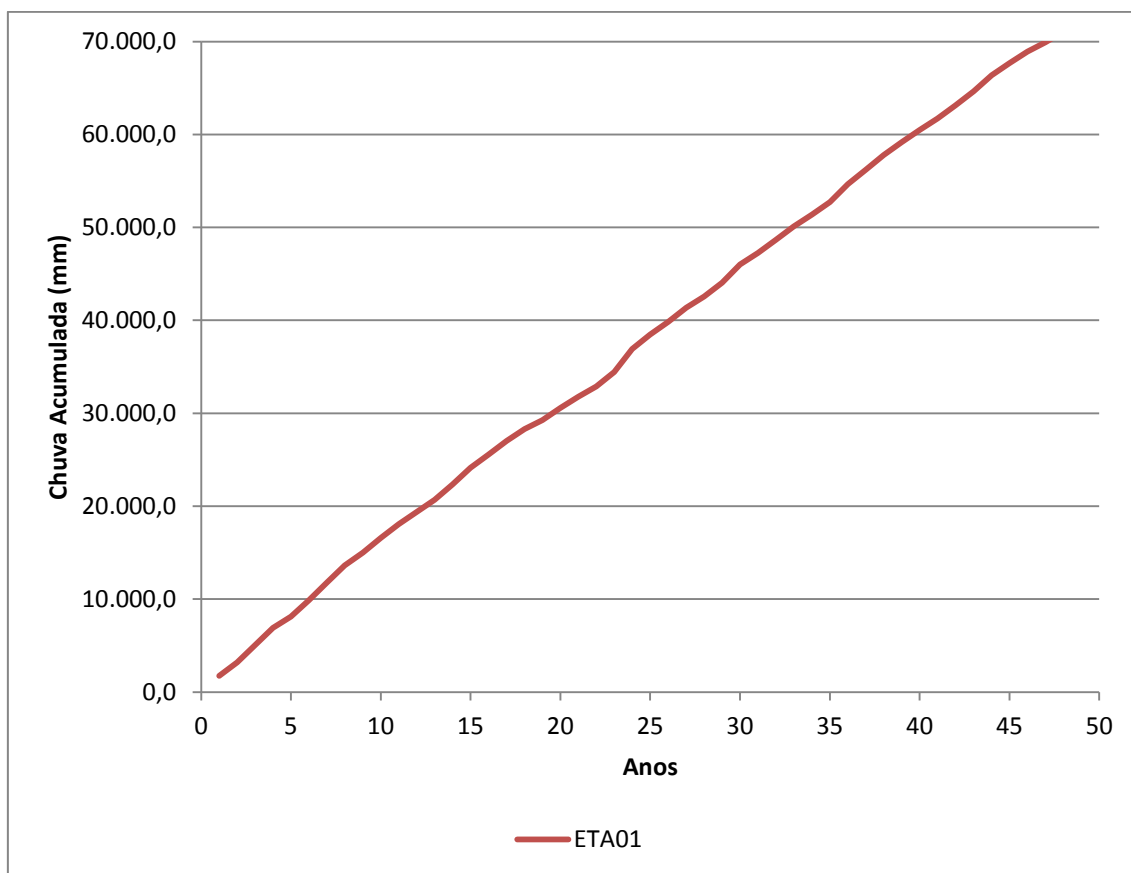


Figura 26 – Curva de totais anuais precipitados acumulados em ETA01 (Fonte: O Autor, 2014).

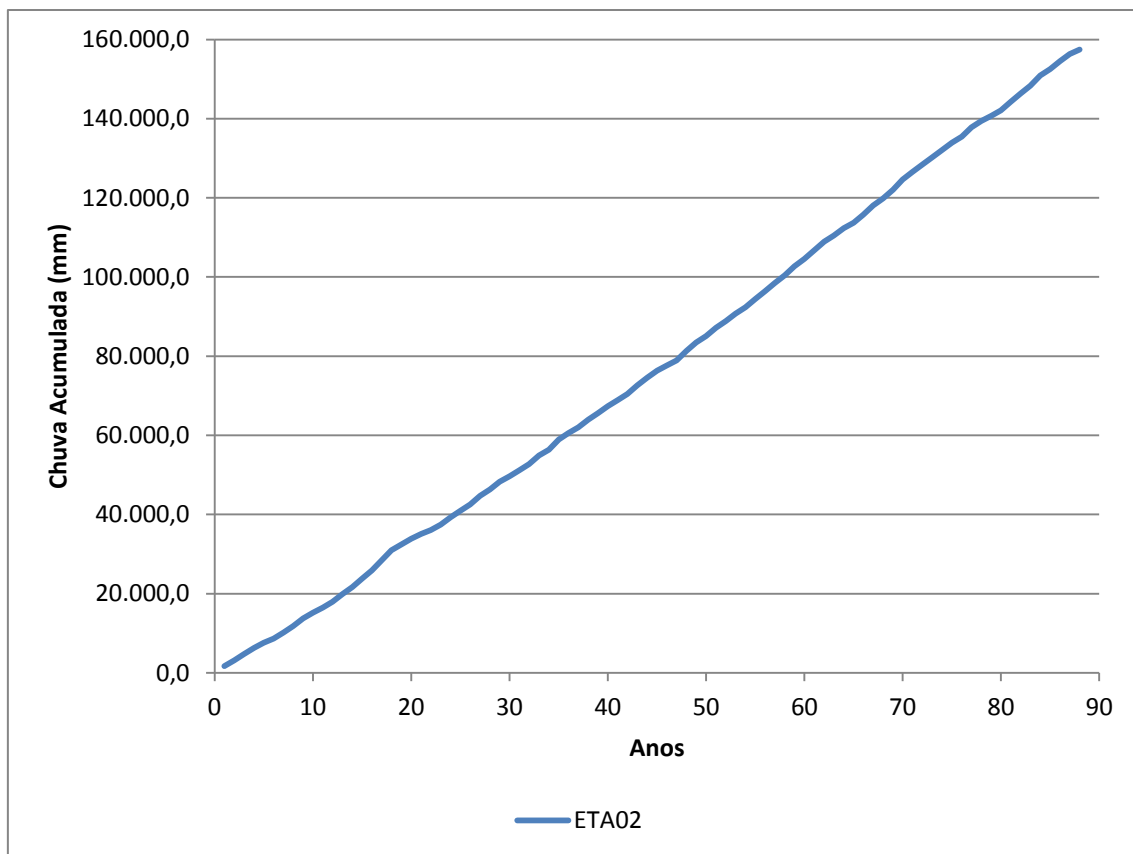


Figura 27 – Curva de totais anuais precipitados acumulados em ETA02 (Fonte: O Autor, 2014).

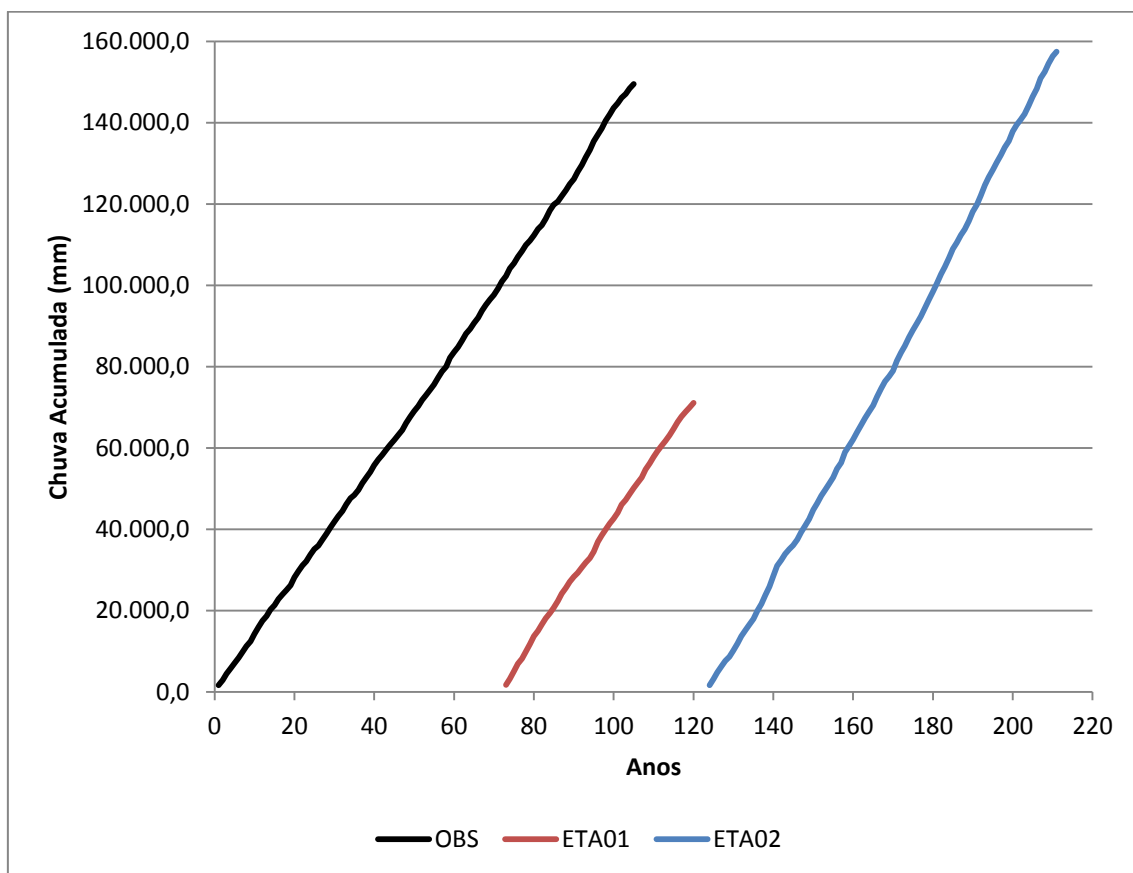


Figura 28 – Curvas de totais anuais precipitados acumulados (Fonte: O Autor, 2014).

Conforme a Figura 25, não são observadas mudanças significativas de declividades. A reta resultante da análise das chuvas acumuladas permite afirmar que ocorre um comportamento quase linear nas chuvas em Curitiba, ou seja, há um suave acréscimo na inclinação da reta em 1950 (52), na Figura 25. Na Figura 26 (cenário ETA01) não são observadas mudanças significativas de declividades. Neste cenário percebeu-se que a reta é linear, ocorrendo suaves flutuações. Na Figura 27 (ETA02) é visível que ocorre uma tendência crescente (positiva) a partir do ano de 2056 (35), indicando um aumento das precipitações em Curitiba para o futuro.

Com o intuito de investigar a consistência das alterações de declividade e das análises dos gráficos RAPS, os anos onde ocorrem alterações foram sintetizados na Tabela 7, de acordo com cada método analisado. Para tal, foram aplicados testes estatísticos (descritos no item 2) nos anos onde foram visíveis alterações nas médias.

Nas primeiras linhas da Tabela 7, constam os anos de possíveis alterações, obtidos da análise visual dos gráficos RAPS. Na sequência, o método Curva Cumulativa foi realizado traçando retas manualmente (utilizando réguas) e traçando retas no *software* EXCEL, ambas para identificar alterações na declividade da reta.

As colunas (Ano eq.) representam os anos equivalentes nos gráficos apresentados anteriormente. Os anos onde foram identificados como mais significativos para as análises (ponto de maior inversão no gráfico RAPS e ponto de alterações de declividades nas retas dos gráficos dos totais anuais acumulados) foram destacados em laranja para o método RAPS e em verde para o método Curva Cumulativa.

Percebe-se que ocorrem mais alterações do que uma simples análise visual. E a “Divisão na Metade” realizou-se de acordo com os estudos de TOZZI (2014). Foram aplicados os testes estatísticos t de Student, F de Snedecor, Mann-Whitney e o rho de Spearman.

Todos os testes foram aplicados com o intuito de verificar o grau de significância destas alterações. Sendo assim, os resultados dos testes indicam se ocorrem tendências nas séries OBS, ETA01 e ETA02. Os resultados de todos os testes estão sintetizados na Tabela 8 e na Tabela 9. Os resultados numéricos dos testes estão disponíveis no Apêndice 02, desta dissertação.



Tabela 7 – Possíveis anos onde ocorreram alterações na média (Fonte: O Autor, 2014).

Método	OBS	Ano eq.	ETA01	Ano eq.	ETA02	Ano eq.
RAPS	1952	54	1982	22	2023	12
	1992	90	1995	35	2028	17
	2002	99	2002	42	2058	47
	-	-	-	-	2091	80
	-	-	-	-	2095	84
Curva Cumulativa	1905	14	1975	15	2025	14
	1925	27	1980	20	2030	19
	1950	52	1986	26	2035	24
	-	-	-	-	2056	35
Divisão na Metade	1950	52	1985	25	2055	44

Os resultados da Tabela 8 são interpretados como a quantidade de rejeições por aceite em cada um dos anos onde foram observadas alterações na média. Significa afirmar que no método RAPS em 1952, cenário OBS, ocorreu uma rejeição para um aceite (1\_1). No mesmo método e cenário ETA02, em 2023 ocorrem duas rejeições para nenhum aceite (2\_0). Já no método Divisão na Metade em 2055, no cenário ETA02, ocorreu novamente uma rejeição para um aceite (1\_1). Na Tabela 8, os testes aplicados foram os paramétricos t de Student e F de Snedecor.

Tabela 8 – Resultados dos testes estatísticos t e F (Divisão em cada ano onde foram observadas alterações na média) (Fonte: O Autor, 2014).

Quantidade de rejeições por aceite											
Método	RAPS										
Cenário	OBS			ETA01			ETA02				
Ano	1952	1992	2002	1982	1995	2002	2023	2028	2058	2091	2095
Resultado	1_1	0_2	0_2	0_2	0_2	0_2	2_0	0_2	1_1	0_2	0_2
Método	Curva Cumulativa										
Cenário	OBS			ETA01			ETA02				
Ano	1905	1925	1950	1975	1980	1986	2025	2030	2035	2056	-
Resultado	0_2	0_2	1_1	1_1	0_2	0_2	1_1	0_2	1_1	1_1	-
Método	Divisão na Metade										
Cenário	OBS			ETA01			ETA02				
Ano	1950	-	-	1985	-	-	2055	-	-	-	-
Resultado	1_1	-	-	1_1	-	-	1_1	-	-	-	-
H0	Aceita			Aceita			Rejeita				
Tendência	Não			Não			Sim				

De acordo com os resultados obtidos (Tabela 8), não são comprovadas presenças de tendências na série hidrológica observada. Em OBS não foi observada tendência em todo o período na maior parte das divisões. Tal análise ocorreu devido ao fato de que a maioria das divisões para todos os métodos descritos resultou em um número de rejeições inferior ao número de aceites. Foi considerado que em caso de empate (número de rejeições *versus* número de aceites), ocorre tendência nas séries (BUCHIR, 2013).

Em ETA01 observa-se um número de rejeições menor em relação ao número de aceites da hipótese nula. Ao total, para todas as divisões e métodos, ocorre empate apenas em 1975 no método Curva Cumulativa e em 1985 no método Divisão na Metade. Para os outros ocorrem aceites da hipótese nula, evidenciando que não ocorrem tendências significativas no cenário ETA01. Em caso de empate, foi considerada também a ocorrência de tendência nas séries.

Sendo assim, no cenário ETA02, ocorre uma rejeição com número superior ao número de aceites e cinco rejeições empatadas com o número de aceites e foram consideradas rejeitadas, conforme descrito anteriormente. Apenas três aceites são percebidos na divisão das séries pelo método RAPS. Devido ao fato de possuir mais rejeições que aceites, foi considerado que ocorre tendência na série simulada ETA02 (Tabela 8). Os resultados numéricos destes testes encontram-se no Apêndice 01 desta dissertação.

Na Tabela 9 encontram-se os resultados obtidos da aplicação dos testes não paramétricos Mann Whitney (U) e rho de Spearman. As mesmas considerações realizadas na análise dos resultados obtidos da aplicação dos testes paramétricos foram adotadas nos testes não paramétricos. Estas são de acordo com o número de rejeições por aceite e critério de desempate.

Dos resultados da Tabela 9, constata-se que não ocorrem tendências na série observada pela aplicação dos testes de Mann Whitney e rho de Spearman. Tendências são constatadas em ambos os cenários gerados pelo modelo ETA, resultando em um número de rejeições superior em relação ao número de aceites. Em ETA01 observou-se a ocorrência de três eventos onde o número de rejeições resultou em duas contra zero número de aceites. Em ETA02 foram observados cinco eventos com número de rejeições superior ao

de aceites. Os demais anos resultaram em empate e consideradas aceites as hipóteses, indicando a presença de tendências.

Tabela 9 – Resultados dos testes estatísticos U e rho (Divisão em cada ano onde foram observadas alterações na média) (Fonte: O Autor, 2014).

Quantidade de rejeições por aceite											
Método	RAPS										
Cenário	OBS			ETA01			ETA02				
Ano	1952	1992	2002	1982	1995	2002	2023	2028	2058	2091	2095
Resultado	0_2	1_1	1_1	1_1	2_0	1_1	1_1	1_1	2_0	1_1	1_1
Método	Curva Cumulativa										
Cenário	OBS			ETA01			ETA02				
Ano	1905	1925	1950	1975	1980	1986	2025	2030	2035	2056	-
Resultado	0_2	0_2	0_2	2_0	1_1	1_1	1_1	2_0	2_0	2_0	-
Método	Divisão na Metade										
Cenário	OBS			ETA01			ETA02				
Ano	1950	-	-	1985	-	-	2055	-	-	-	-
Resultado	0_2	-	-	2_0	-	-	2_0	-	-	-	-
H0	Aceita			Rejeita			Rejeita				
Tendência	Não			Sim			Sim				

Com o intuito de consolidar os resultados obtidos nas análises anteriores, foi aplicado o teste de Mann Kendall para os totais precipitados anuais (Tabela 10). Também foram analisadas as chuvas médias, máximas e mínimas mensais de cada ano para uma melhor compreensão do padrão das precipitações anuais, conforme é visto também na Tabela 10.

Tabela 10 – Análise das precipitações anuais - Mann Kendall ( $\alpha = 5\%$ ) Aceita H0:  $Z(\text{tab.}) = 1,96$  (Fonte: O Autor, 2014).

Período Anual	OBS	ETA01	ETA02
	Situação	Situação	Situação
Total	Aceita H0	Rejeita H0	Rejeita H0
Máx.	Aceita H0	Aceita H0	Rejeita H0
Mín.	Aceita H0	Rejeita H0	Aceita H0
Méd.	Aceita H0	Rejeita H0	Rejeita H0
Tendência	Não	Sim	Sim

A hipótese nula é aceita para um nível de significância de 5% em todas as situações estudadas para o cenário OBS. Significa afirmar que não ocorrem tendências no período histórico, de acordo com os resultados do teste de Mann Kendall. Para os cenários gerados pelo modelo ETA, ambos apresentaram um

número de rejeições superior em relação ao número de aceites, conforme resultados da Tabela 10. Isto indica que ocorrem tendências tanto em ETA01, quanto em ETA02.

O cenário ETA01 que corresponde ao período de 1961 a 2008, não apresentou tendências no regime de chuvas anuais na análise das precipitações máximas. Porém no cenário ETA02, que corresponde ao período futuro (2012 a 2099), observa-se que não ocorrem tendências quanto à análise das chuvas mínimas. A análise foi realizada rejeitando as hipóteses de  $H_0$  quando o módulo dos resultados do  $Z_{calc}$  foi superior a 1,96.

Conclui-se da análise anual, que as chuvas apresentaram tendência em alguns dos testes aplicados nos cenários OBS e ETA01. Foram identificadas tendências de acréscimo na série histórica, analisando a Figura 19, Tabela 5 e Tabela 6. Na análise das “Curvas Cumulativas” (Figura 26) e nas estatísticas descritivas (Tabela 4), não foram encontradas tendências em ETA01. Porém nos outros testes foram identificadas possíveis tendências para este cenário. Como os testes estatísticos nem sempre são conclusivos, é possível afirmar que o cenário ETA01 representa o cenário das chuvas observadas.

É possível concluir que as chuvas do cenário ETA02 apresentam uma tendência para todos os testes aplicados. A tendência é observada como positiva através do diagrama “Curvas Cumulativas” (Figura 27), da análise dos coeficientes das retas de regressão linear (Tabela 5 e Figura 21) e também das estatísticas descritivas (Tabela 4). Com o intuito de consolidar os resultados obtidos na análise das chuvas anuais, as mesmas foram estudadas quanto à sazonalidade, visto no próximo subitem.

## 5.2. Análise Sazonal

Após a análise anual, os cenários de precipitação foram submetidos a uma análise sazonal. Esta ocorreu observando os totais mensais precipitados dividindo estes em duas e quatro estações do ano. Na divisão em duas estações, segundo TOZZI (2014) e FILL *et al.* (2008), foram chamadas de verão as séries de chuva que compreendem o período de novembro a abril. Logo as séries de inverno compreendem o período de maio a outubro. Estes

autores realizaram os estudos para dividir os anos em períodos utilizando séries de vazões, podendo a divisão dos meses ter sido diferente no caso das chuvas.

Também foram analisadas as chuvas trimestrais, compreendendo os meses das estações do ano: Verão (dezembro a fevereiro), Outono (março a maio), Inverno (junho a agosto) e Primavera (setembro a novembro). Tanto para as análises semestrais, quanto para as trimestrais, foram analisados os totais precipitados nestes períodos. Nos próximos subitens estão apresentadas as análises sazonais.

#### 5.2.1. Análise Semestral – 2 Estações (Verão e Inverno)

Conforme realizado na análise anual, primeiramente foram retiradas as estatísticas descritivas das precipitações semestrais. A Tabela 11 apresenta os totais precipitados na estação semestral verão (novembro a abril). As estatísticas foram geradas para as chuvas observadas pela estação pluviométrica e para os dois cenários de precipitação do modelo ETA.

Pode-se constatar através das estatísticas da Tabela 11 uma boa representação do cenário das chuvas observadas pelo cenário ETA01. As médias e medianas possuem valores próximos, assim como são pouco diferentes quanto ao coeficiente de assimetria. O cenário ETA01 acaba por sobrepujar um pouco os valores extremos (mínimos e máximos). O desvio padrão entre as duas amostras e o excesso curtose foram diferentes, porém aceitáveis.

Ainda na Tabela 11, o cenário ETA02 apresentou uma elevação considerável na média e mediana, tornando evidente a presença de uma tendência de acréscimo nas chuvas na estação verão. Tal acréscimo é percebido também analisando os valores extremos. Tanto a mínima, quanto a máxima são superiores em relação aos cenários OBS e ETA01. Os outros indicadores tais como o desvio padrão, excesso de curtose e assimetria mostram que a dispersão e distribuição dos valores são próximas do que ocorre em ambos os cenários do período histórico.

Tabela 11 – Estatísticas descritivas dos totais semestrais precipitados no verão (Fonte: O Autor, 2014).

Estatísticas	OBS	ETA01	ETA02
N	44	48	88
Média	839,55	855,48	973,86
Mediana	830,75	841,16	972,24
$\sigma$	193,82	155,62	178,40
Ex. Curtose	-0,84	0,38	-0,37
Assimetria	-0,06	0,12	0,07
Min	486,60	508,22	592,05
Max	1217,70	1276,26	1389,58

Podem estar ocorrendo tendências de acréscimo nas chuvas que compreendem esta estação semestral para o período futuro. Para isto foram realizadas outras análises estatísticas com o intuito de confirmar a presença e o grau destas tendências. A análise de inverno encontra-se no Apêndice 04.

No inverno, através da análise das estatísticas descritivas do ETA01, foi observado que a média, mediana e mínima foram inferiores neste cenário, em relação ao OBS. Não foram apresentadas tendências para o ETA02 no inverno. De maneira análoga ao realizado na análise das chuvas anuais, foram elaborados os diagramas com as funções suavizadoras de média e mediana móveis, regressões LOWESS e linear.

Abaixo estão os gráficos das funções utilizadas com o intuito de identificar as tendências na estação verão. Os diagramas referentes à estação inverno estão apresentados no Apêndice 04 desta dissertação. A Figura 29 representa características das chuvas observadas na estação hidrológica (OBS). De maneira análoga, foram elaborados os gráficos para os cenários ETA01 e ETA02, conforme representado pela Figura 30 e Figura 31.

Vale ressaltar que para a construção dos gráficos, foi considerada uma escala de equivalência, sendo na série observada o ano 1 equivalente ao 1889, no cenário ETA01 ao ano 1961 e no cenário ETA02 ao ano 2012.

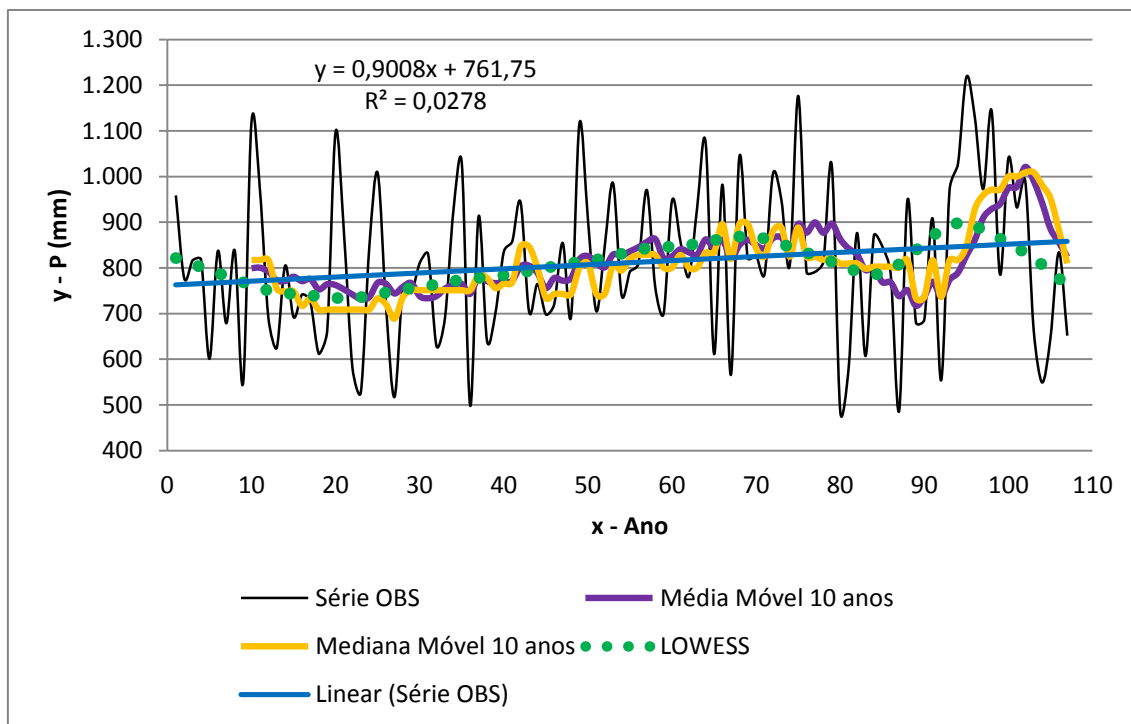


Figura 29 – Gráficos dos totais semestrais precipitados no verão para OBS (Fonte: O Autor, 2014).

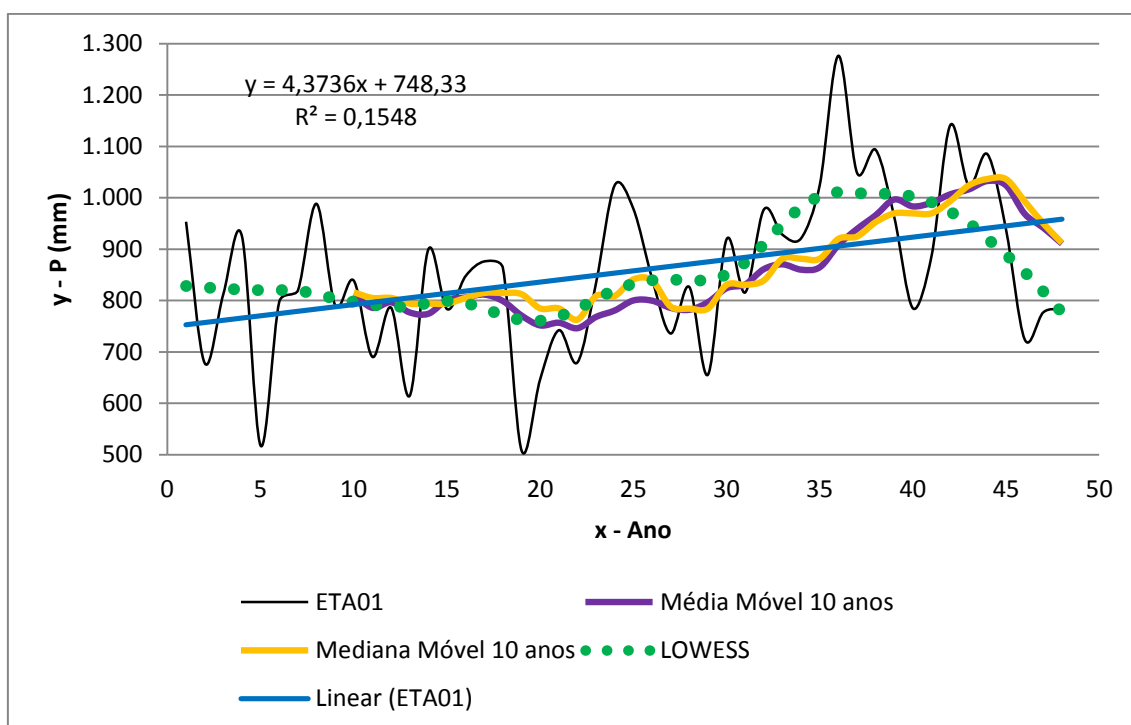


Figura 30 – Gráficos dos totais semestrais precipitados no verão para ETA01 (Fonte: O Autor, 2014).

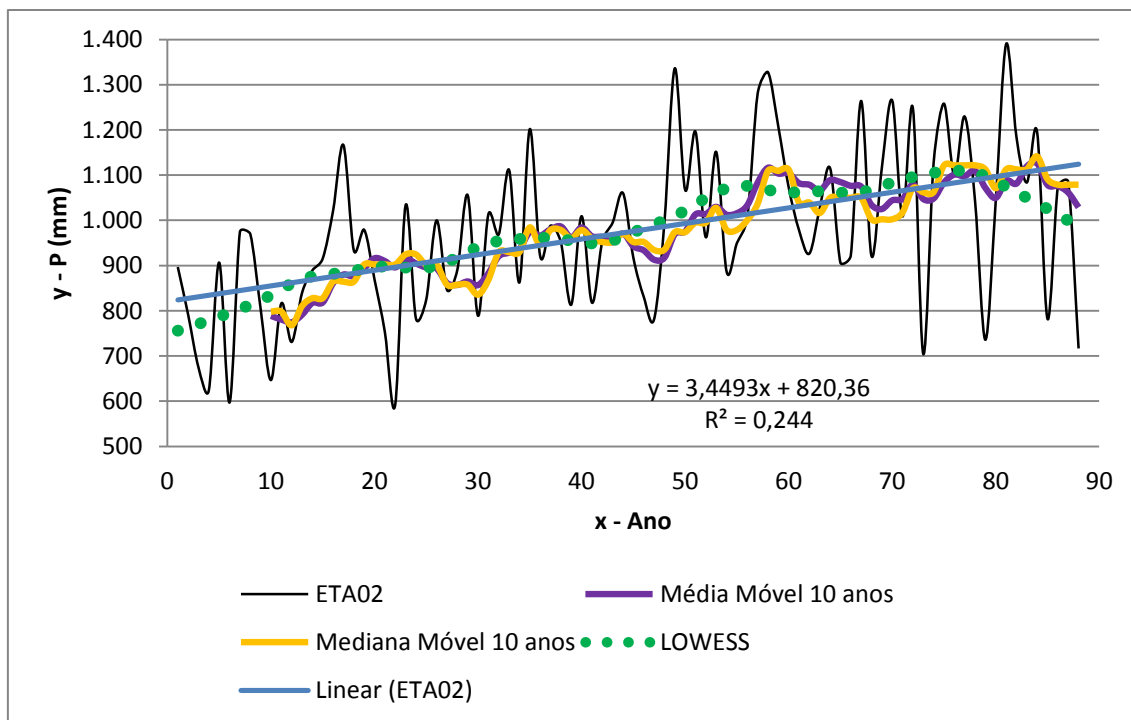


Figura 31 – Gráficos dos totais semestrais precipitados no verão para ETA02 (Fonte: O Autor, 2014).

Nos diagramas representados pela Figura 29, Figura 30 e Figura 31, é visível que ocorre uma tendência positiva em todas as séries. Tal constatação se deu pela análise da reta de regressão linear e das funções suavizadoras e da regressão LOWESS. Estas últimas tendem a suavizar os valores de OBS, ETA01 e ETA02, aproximando-os à reta de regressão linear. Na Tabela 12 encontram-se as equações de regressão linear com seus respectivos coeficientes de determinação para a estação verão.

Tabela 12 – Equações de regressão linear para os totais semestrais precipitados no verão (Fonte: O Autor, 2014).

Equações de Regressão Linear	OBS	ETA01	ETA02
	$y = 0,9008x + 761,75$	$y = 4,3736x + 748,33$	$y = 3,4493x + 820,36$
$R^2$	0,0278	0,1548	0,2440

De maneira análoga como realizado na análise anual, os coeficientes angulares das retas de regressão linear foram testados se são estatisticamente nulos e apresentados na Tabela 13. A hipótese nula, dado um nível de



significância  $\alpha = 5\%$  é de que  $H_0: b = 0$ , sendo  $b$  o coeficiente angular da reta de regressão linear (amplamente descrito no item 2). Os coeficientes angulares das retas de regressão são todos positivos, indicando que podem estar ocorrendo tendências de acréscimo nas precipitações.

Tabela 13 – Resultado do teste de hipótese do coeficiente angular da reta de regressão linear (Fonte: O Autor, 2014).

Cenário	t	t (tab.)	Resultado	Tendência
OBS	1,7328	1,9837	Aceita $H_0$	Não
ETA01	2,9026	2,0129	Rejeita $H_0$	Sim
ETA02	5,2685	1,9890	Rejeita $H_0$	Sim

Conforme resultados da Tabela 13, para as chuvas que compreendem o semestre verão, o teste do coeficiente angular da reta de regressão linear das chuvas observadas não apresenta tendência. Porém o mesmo não ocorre com os cenários ETA01 e ETA02. Tal constatação é realizada partindo do pressuposto que rejeitando a hipótese  $H_0$ , é possível que ocorra tendência nos cenários analisados.

O inverno (maio a outubro) apresenta uma pequena divergência na aceitação e/ou rejeição dos testes. O resultado dos testes apresentou uma tendência negativa na reta de regressão linear em ETA01. O mesmo comportamento para a reta ocorreu na análise anual neste cenário.

Para o cenário ETA02, foi apresentada uma tendência para o ETA02 no inverno. A reta de regressão linear apontou um suave acréscimo, olhando para o coeficiente angular, mas o resultado do teste de hipótese aceitou a hipótese nula. Como os testes estatísticos nem sempre são conclusivos, é possível afirmar que o cenário ETA01 representa o cenário das chuvas observadas. Os resultados das análises do inverno encontram-se no Apêndice 04 desta dissertação.

Prosseguindo com a EDA, foram elaborados gráficos utilizando o método RAPS, conforme descrito no item 2. O RAPS foi aplicado com a intenção de identificar possíveis tendências tanto na série hidrológica, quanto nas séries geradas pelo modelo ETA. Os gráficos do método RAPS estão

apresentados na sequência pela Figura 32, Figura 33 e Figura 34. Tais figuras representam os cenários OBS, ETA01 e ETA02, respectivamente.

De acordo com os diagramas RAPS para o semestre verão (Figura 32, Figura 33 e Figura 34), os pontos mais baixos e elevados (picos e vales do gráfico) mostram alterações abruptas nas séries (pontos de alteração na média). Tais anos foram resumidos na Tabela 14 para a estação verão, assim como os anos do inverno (tabela que se encontra nos Apêndices 03 e 04 desta dissertação).

Tal qual foi constatado na análise anual é a relação dos gráficos RAPS com o coeficiente da reta de regressão linear. Onde este foi negativo (Cenário ETA01 do inverno, no Apêndice 04 desta dissertação), o gráfico RAPS teve desvios acima da linha zero em relação aos demais com o coeficiente positivo (também no Apêndice 04), onde os desvios foram geralmente abaixo da linha zero. Isto indica que quando há diferenças acima da linha zero, ocorrem tendências negativas, conforme ALEMAW e CHAOKA (2002).

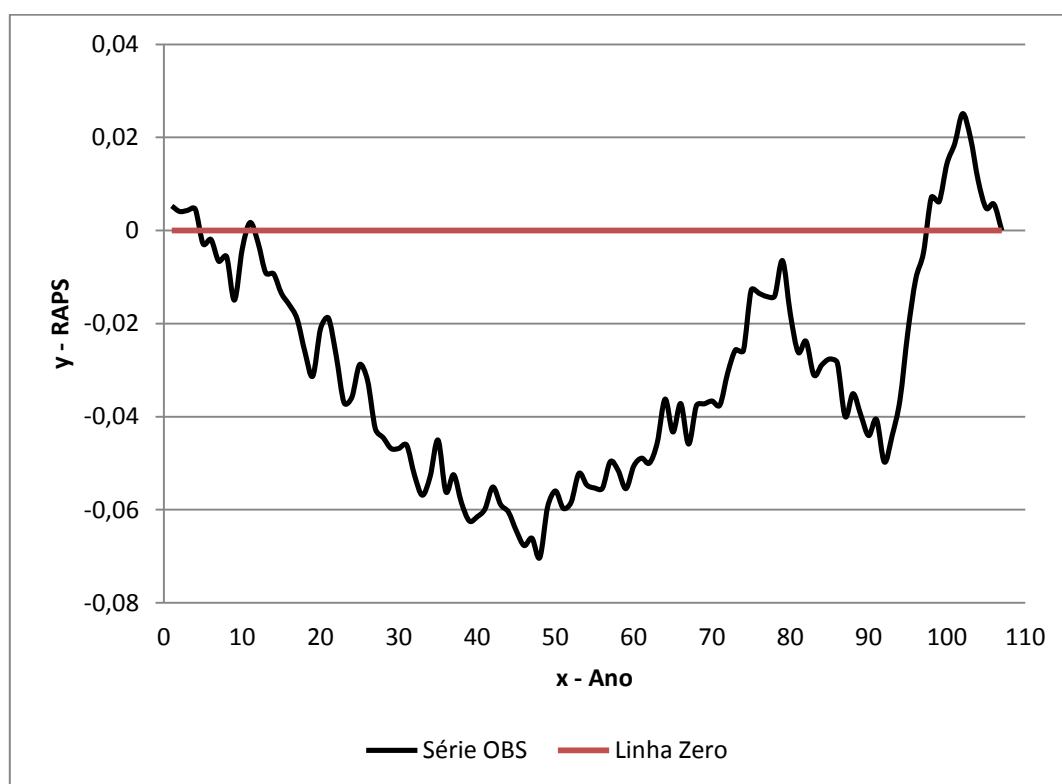


Figura 32 – RAPS dos totais semestrais precipitados (verão – OBS) (Fonte: O Autor, 2014).

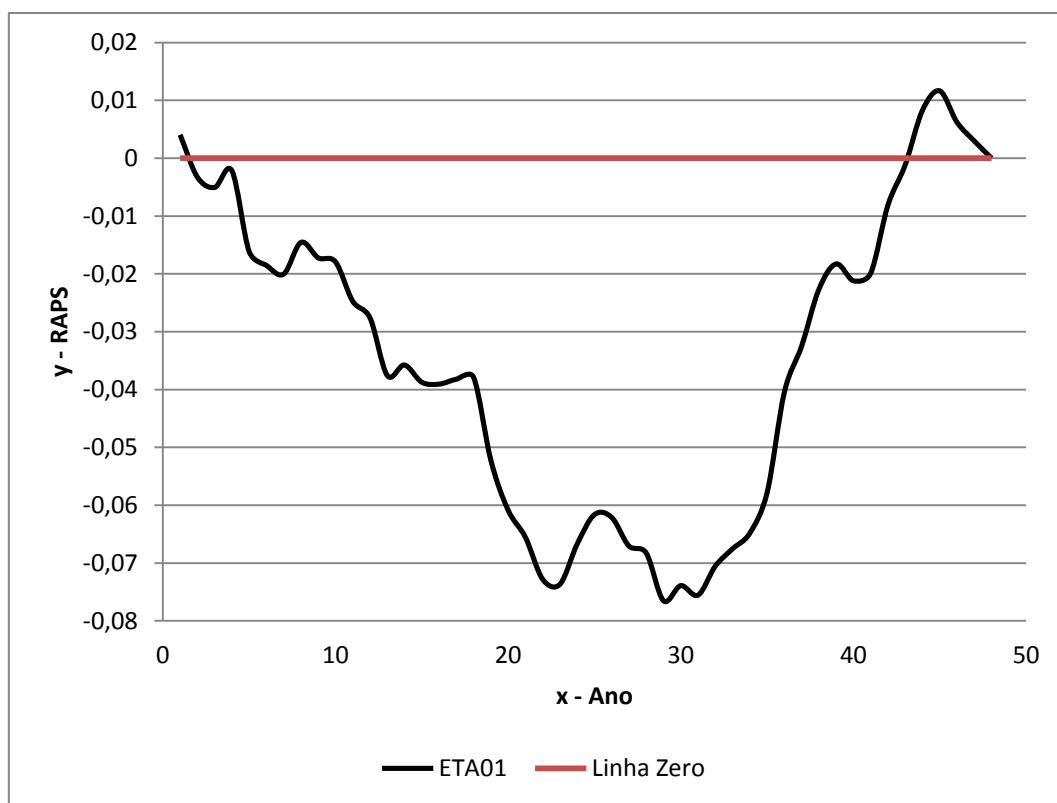


Figura 33 – RAPS dos totais semestrais precipitados (verão – ETA01) (Fonte: O Autor, 2014).

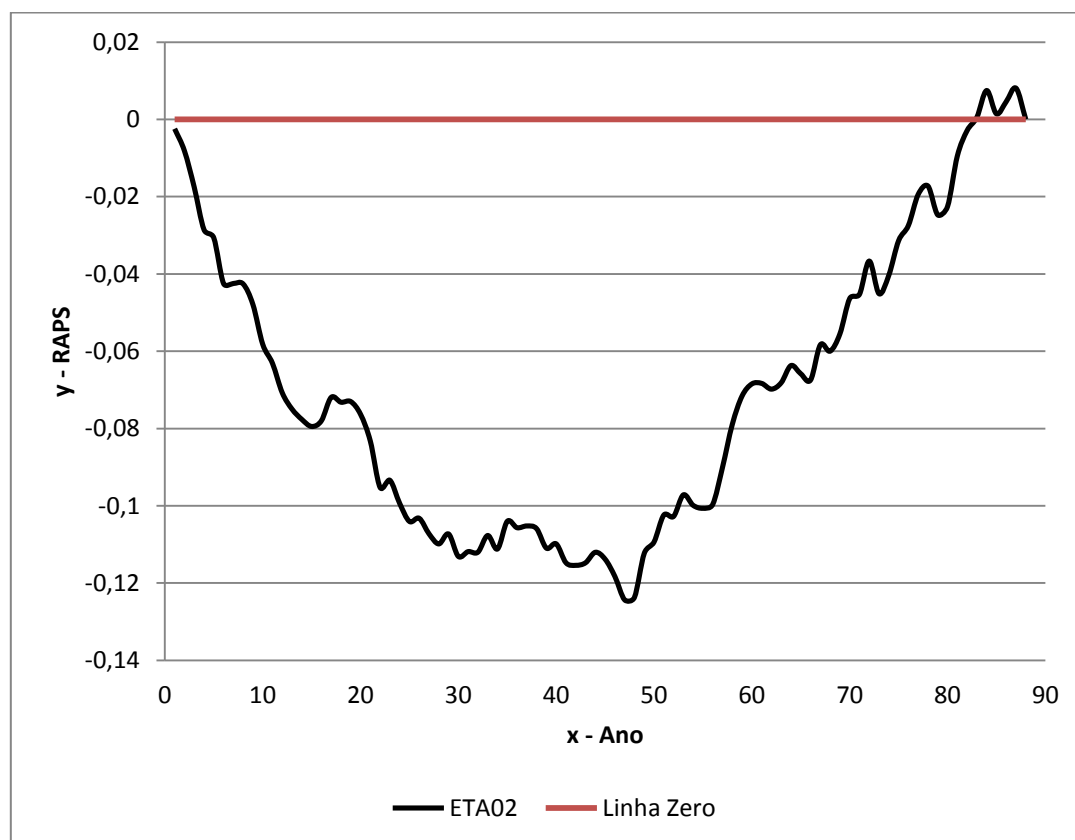


Figura 34 – RAPS dos totais semestrais precipitados (verão – ETA02) (Fonte: O Autor, 2014).

Assim como as tabelas, os gráficos RAPS da estação inverno também estão no Apêndice 04. Nos anos que ocorrem alterações abruptas identificadas nos gráficos RAPS foram aplicados os testes estatísticos Mann-Whitney e rho de Spearman.

Tabela 14 – Possíveis anos onde ocorreram alterações na média (Fonte: O Autor, 2014).

Método de Análise	OBS	Ano eq.	ETA01	Ano eq.	ETA02	Ano eq.
RAPS	1945	47	1983	23	2058	47
	1977	78	1988	28	2095	84
	1992	90	2005	45	-	-
	2003	100	-	-	-	-
Divisão na Metade	1950	52	1985	25	2055	44

Na Tabela 14, as colunas (Ano eq.) representam os anos equivalentes nos gráficos apresentados anteriormente. Os anos onde foram identificados como mais significativos para as análises (ponto de maior inversão no gráfico RAPS) foram destacados em laranja.

Os testes foram aplicados com o intuito de verificar o grau de significância destas alterações abruptas e identificar se ocorrem tendências nos cenários OBS, ETA01 e ETA02. Os resultados de todos os testes aplicados para a estação verão estão sintetizados na Tabela 15. Os resultados numéricos dos testes, bem como as análises referentes à estação inverno estão disponíveis nos Apêndices 03 e 04, desta dissertação.

Os resultados da Tabela 15 são interpretados como a quantidade de rejeições por aceite em cada um dos anos onde foram observadas alterações na média. Significa afirmar que no método RAPS em todas as divisões realizadas no cenário OBS, ocorreu nenhuma rejeição para dois aceites (0\_2). Já no método Divisão na Metade em 2055, no cenário ETA02, ocorreram duas rejeições para nenhum aceite (2\_0).

Na Tabela 15 estão os resultados das aplicações dos testes não paramétricos Mann Whitney (U) e rho de Spearman. Os testes paramétricos não foram aplicados para a sazonalidade, pois não necessariamente se ajustam a uma distribuição normal.

Tabela 15 – Resultados dos testes estatísticos U e rho (Divisão em cada ano onde foram observadas alterações na média) (Fonte: O Autor, 2014).

Quantidade de rejeições por aceite									
Método	RAPS								
Cenário	OBS				ETA01			ETA02	
Ano	1945	1977	1992	2003	1983	1988	2005	2058	2095
Resultado	0_2	0_2	0_2	0_2	1_1	2_0	1_1	2_0	1_1
Divisão na Metade									
Cenário	OBS				ETA01			ETA02	
Ano	1950	-	-	-	1985	-	-	2055	-
Resultado	0_2	-	-	-	1_1	-	-	2_0	-
H0	Aceita				Rejeita			Rejeita	
Tendência	Não				Sim			Sim	

De acordo com os resultados obtidos mostrados na Tabela 15, não são comprovadas presenças de tendências na série hidrológica para o semestre verão. No cenário OBS foi observada tendência nas divisões realizadas segundo os dois métodos. Tal constatação ocorreu pelo número de rejeições terem sido superiores ao número de aceites, ou no caso de empate (BUCHIR, 2013).

Em ETA01 observa-se um número de rejeições menor em relação ao número de aceites da hipótese nula. São constatadas duas rejeições para nenhum aceite nos anos de 1988 e nos demais, uma rejeição para um aceite. O mesmo critério de desempate adotado na análise anual foi adotado também na análise do semestre. Sendo assim, teve a ocorrência de tendência na série em caso de empate (número de rejeições *versus* número de aceites).

No cenário ETA02, são observadas duas ocorrências onde há duas rejeições para nenhum aceite nos anos 2055 e 2058 e uma rejeição para um aceite no ano de 2095. Com um número superior de rejeições em relação aos aceites, foi constatada que ocorrem tendências no cenário ETA02. Na análise do inverno foi observada tendência apenas no cenário ETA01.

Com o intuito de consolidar os resultados obtidos nas análises anteriores, foi aplicado o teste de MKS para os totais precipitados semestrais (Tabela 16). Também foram analisadas as chuvas médias, máximas e mínimas semestrais para obter uma melhor compreensão do padrão das precipitações

sazonais (Tabela 16). O teste de MKS foi calculado considerando a independência serial das séries.

Tabela 16 – Análise das precipitações semestrais (verão) - Mann Kendall Sazonal ( $\alpha = 5\%$ )  
Aceita  $H_0$ :  $Z(\text{tab.}) = 1,96$  (Fonte: O Autor, 2014).

Período	Análise	OBS	ETA01	ETA02
		Situação	Situação	Situação
Verão	Total	Aceita $H_0$	Rejeita $H_0$	Rejeita $H_0$
	Máx.	Aceita $H_0$	Rejeita $H_0$	Rejeita $H_0$
	Mín.	Aceita $H_0$	Aceita $H_0$	Aceita $H_0$
	Méd.	Aceita $H_0$	Rejeita $H_0$	Rejeita $H_0$
H0		Rejeita	Rejeita	Rejeita
Tendência		Sim	Sim	Sim

Em todas as situações estudadas para o cenário OBS, a hipótese nula é aceita para um nível de significância 5%. Significa afirmar que não ocorrem tendências no período histórico (nas duas estações), de acordo com os resultados do teste de MKS. O cenário ETA01 apresenta apenas um aceite da hipótese nula para as chuvas mínimas mensais do verão. As demais análises deste cenário, para as duas estações apresentaram rejeições da hipótese, indicando a presença de tendências.

No cenário ETA02, que corresponde ao período futuro (2012 a 2099), observa-se que não ocorrem tendências quanto à análise das chuvas mínimas mensais no verão. Também não ocorrem tendências em todas as análises realizadas no semestre inverno, ou seja, nem nas máximas, mínimas, médias mensais e nem nos totais precipitados no semestre. A análise foi realizada rejeitando as hipóteses de  $H_0$  quando o módulo dos resultados do  $Z_{calc}$  foi superior a 1,96.

Conclui-se da análise semestral pelo teste de MKS, que as chuvas apresentam uma tendência para quase todos os períodos onde foram aplicados os testes. Na análise semestral, o cenário ETA02 se mostrou inconclusivo, pois apresentou tendência para as séries da estação verão e para as séries da estação inverno não apresentou tendência. As aplicações (testes) mencionadas anteriormente estão no Apêndice 04 deste trabalho.

Na estação verão, é observada uma tendência de crescimento (positiva) através da análise dos coeficientes das retas de regressão linear (Tabela 13) e também das estatísticas descritivas (Tabela 11). A análise das estatísticas descritivas mostrou uma tendência positiva. Porém a análise dos coeficientes das retas de regressão linear e aplicação dos testes paramétricos e não paramétricos tais quais descritos no item 2, não apresentou tendência conclusiva.

A aplicação de alguns testes não mostrou resultados conclusivos nas análises de inverno, assim como foi observado na análise anual (tendência decrescente). Significa afirmar que a tendência de alteração se concentra no semestre verão. Sendo assim, os resultados obtidos na análise das chuvas anuais e semestrais foram refinados e submetidos a uma análise trimestral. Foi realizado um estudo das chuvas que ocorrem nos trimestres que correspondem às estações do ano, visto no próximo subitem.

#### 5.2.2. Análise Trimestral – Estações do ano

A análise trimestral foi realizada de acordo com as análises anteriores (anual e semestral). Primeiramente foram calculadas as estatísticas descritivas das precipitações trimestrais. A Tabela 17 apresenta os totais precipitados na estação trimestral verão (dezembro a fevereiro). As estatísticas foram geradas para as chuvas observadas pela estação pluviométrica (OBS) e para os cenários de precipitação ETA01 e ETA02. As estatísticas referentes às estações outono (março a maio), inverno (junho a agosto) e primavera (setembro a novembro), encontram-se respectivamente nos Apêndices 06, 07 e 08 desta dissertação.

De maneira semelhante ao que ocorreu na análise semestral, foi possível constatar através da análise dos indicadores estatísticos que o cenário ETA01 representa bem as chuvas observadas no verão (Tabela 17). Todos os indicadores estatísticos para OBS e ETA01 apresentam valores próximos, com exceção dos valores extremos (mínimas sobrepujadas e máximas minoradas).

Na Tabela 17, observa-se que o cenário ETA02 apresenta uma suave elevação na média e mediana, sendo possível constatar uma tendência de

crescimento (positiva) no verão. Tal acréscimo é percebido também analisando o valor máximo, quando comparados os cenários ETA01 e ETA02. Há um leve acréscimo nas chuvas mínimas. Os outros indicadores estatísticos não apresentaram desvios consideráveis, mostrando uma boa representação das chuvas obtidas pela simulação.

Tabela 17 – Estatísticas descritivas dos totais trimestrais precipitados no verão (Fonte: O Autor, 2014).

Estatísticas	OBS	ETA01	ETA02
N	45	48	88
Média	493,89	484,53	514,46
Mediana	498,50	470,98	518,70
$\sigma$	159,95	123,34	108,35
Ex. Curtose	0,02	-0,04	-0,21
Assimetria	0,49	0,60	0,11
Min	198,10	249,16	251,09
Max	898,30	793,06	802,92

Os estudos de análise de tendências trimestrais foram realizados para todas as estações do ano. Porém estão apresentados apenas os gráficos da estação verão no corpo do trabalho. As demais análises obtidas encontram-se nos Apêndices 06, 07 e 08 desta dissertação.

Tal qual constatado na análise anual e semestral, o cenário ETA01 não representa bem os meses correspondentes às épocas mais frias do ano. Ocorreu uma redução das medianas, médias e mínimas observando as estatísticas descritivas referentes às estações outono, inverno e primavera. Em contrapartida o cenário ETA02 está mostrando tendências positivas (indicadores estatísticos maiores) nas análises de todas as estações.

Na sequência estão os gráficos das regressões lineares e LOWESS e das funções suavizadoras de média e mediana móveis de 10 anos. Os totais acumulados no trimestre (verão) estão representados pela Figura 35 (OBS), Figura 36 (ETA01) e Figura 37 (ETA02). Vale ressaltar que para a construção dos gráficos, foi considerada uma escala de equivalência, sendo na série observada o ano 1 equivalente ao 1889, no cenário ETA01 ao ano 1961 e no cenário ETA02 ao ano 2012. As falhas foram desconsideradas do estudo.



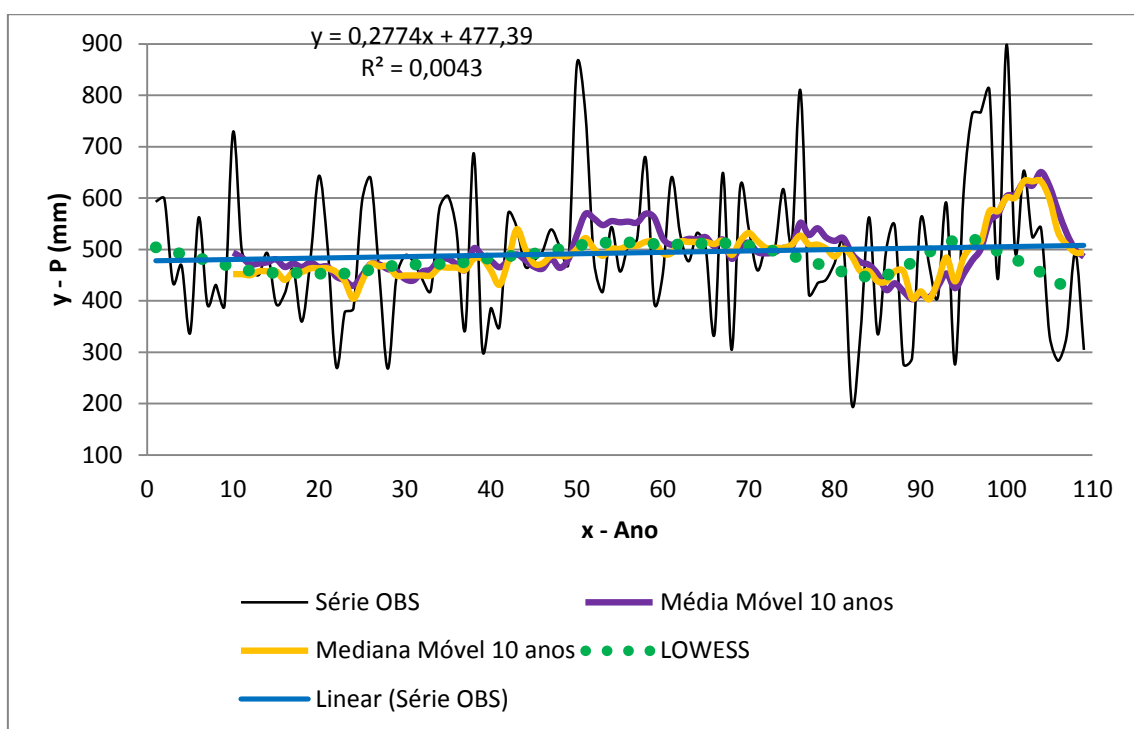


Figura 35 – Gráficos dos totais trimestrais precipitados no verão para OBS (Fonte: O Autor, 2014).

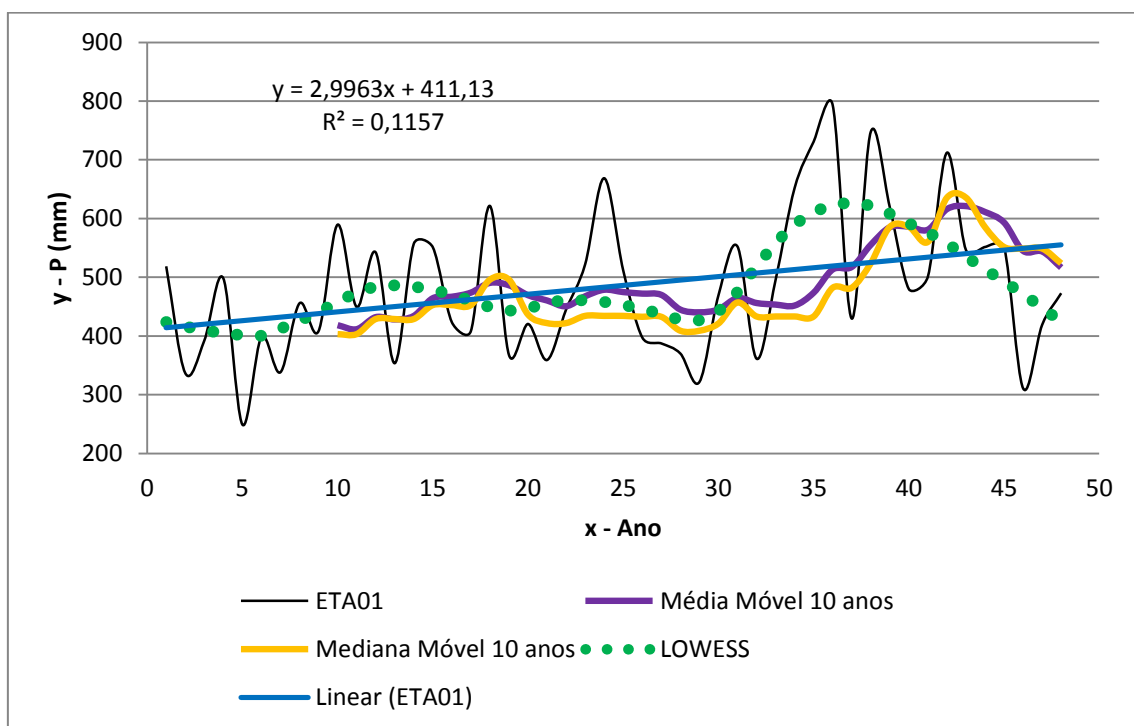


Figura 36 – Gráficos dos totais trimestrais precipitados no verão para ETA01 (Fonte: O Autor, 2014).

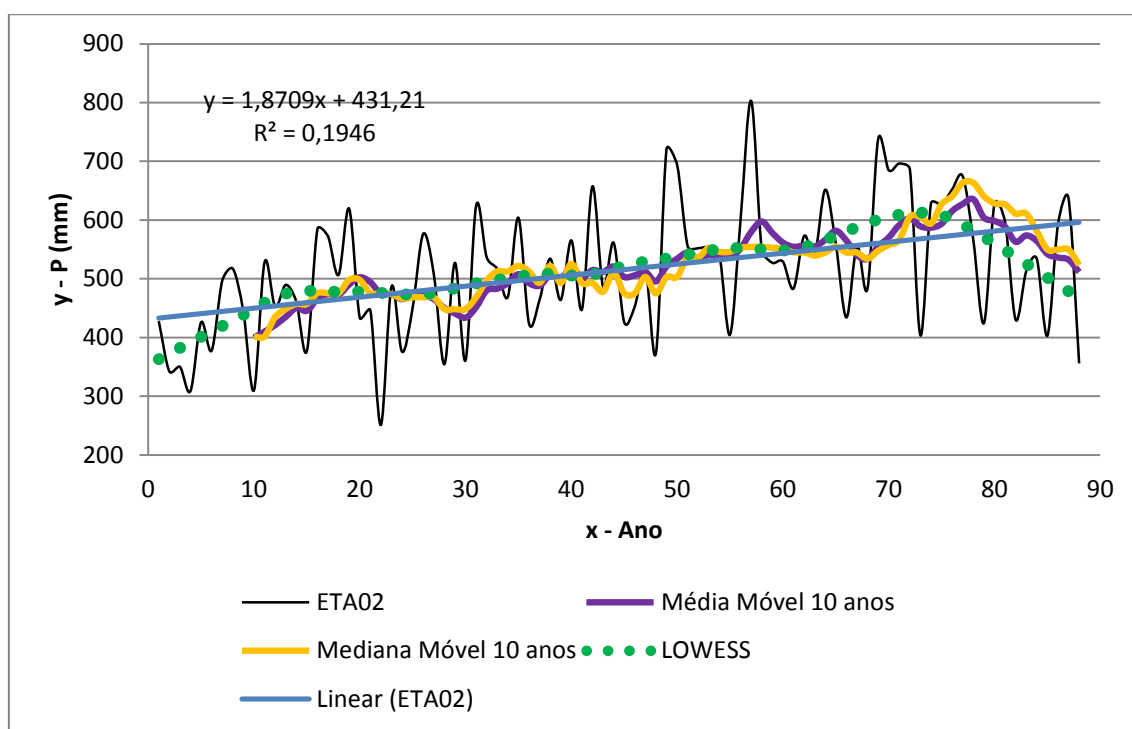


Figura 37 – Gráficos dos totais trimestrais precipitados no verão para ETA02 (Fonte: O Autor, 2014).

Dos diagramas representados pela Figura 35, Figura 36 e Figura 37, observa-se uma tendência de crescimento (positiva) em todos os cenários. Tal constatação ocorreu através da análise da reta de regressão linear, da regressão LOWESS e das funções suavizadoras. Estas últimas tendem a suavizar os valores de OBS, ETA01 e ETA02, aproximando-os à reta de regressão linear.

As equações das retas de regressão linear foram obtidas através da construção dos gráficos. Na Tabela 18 encontram-se as equações de regressão linear do trimestre referente ao verão com seus respectivos coeficientes de determinação. As demais equações, referentes ao trimestre outono, inverno e primavera, encontram-se respectivamente nos Apêndices 06, 07 e 08 desta dissertação.

Os coeficientes angulares das retas de regressão linear apontam uma tendência crescente ao longo dos cenários OBS e ETA02 em todas as

estações do ano. Para o cenário ETA01, o coeficiente angular apresenta uma tendência positiva apenas para o acumulado de chuvas nas estações verão e outono. Os demais coeficientes para este cenário apresentaram uma tendência decrescente (negativa).

Tabela 18 – Equações de regressão linear para os totais trimestrais precipitados no verão (Fonte: O Autor, 2014).

Equações de Regressão Linear	OBS	ETA01	ETA02
	$y = 0,2774x + 477,39$	$y = 2,9963x + 411,13$	$y = 1,8709x + 431,21$
$R^2$	0,0043	0,1157	0,1946

O maior valor do coeficiente angular para o cenário OBS é o da reta que representa o outono e o maior coeficiente angular para o cenário ETA01 é o da reta que representa o verão. Para o cenário futuro (ETA02), o maior coeficiente angular é o da estação verão, seguido pelo outono, primavera e inverno. Conforme foi realizado nas análises anual e semestral, os coeficientes angulares das retas de regressão linear foram testados e apresentados na Tabela 19.

A hipótese nula, dado um nível de significância  $\alpha = 5\%$  é de que  $H_0: b = 0$ , sendo  $b$  o coeficiente angular da reta de regressão linear (amplamente descrito no item 2). Os coeficientes angulares das retas de regressão são todos positivos (com exceção às estações outono e primavera para o cenário ETA01), indicando que podem estar ocorrendo tendências de acréscimo nas precipitações.

Tabela 19 – Resultado do teste de hipótese do coeficiente angular da reta de regressão linear (Fonte: O Autor, 2014).

Cenário	t	t (tab.)	Resultado	Tendência
OBS	0,6798	1,9840	Aceita H0	Não
ETA01	2,4533	2,0167	Rejeita H0	Sim
ETA02	0,4151	1,9886	Aceita H0	Não

De acordo com os resultados da Tabela 19, não ocorrem tendências nos cenários OBS e no ETA02. A presença de tendência ocorreu no cenário

ETA01. Tal fato pode ser constatado devido aos aceites da hipótese nula de  $H_0$  dos cenários OBS e ETA02 e a rejeição da mesma hipótese para o cenário ETA01.

Na análise das demais estações do ano, é visto que ocorrem comportamentos diferentes ao constatado no verão. Em outono são observadas tendências em ETA02. Os coeficientes das retas de regressão linear são todos positivos (outono), assim como o que aconteceu na análise de verão.

Tanto no inverno, quanto na primavera o ETA01 apresentou retas de regressão linear com coeficiente angular negativo. Os testes de hipótese do coeficiente angular da reta, também apontaram tendências significativas na aplicação destes nestas estações, rejeitando a hipótese  $H_0$ .

Como os testes estatísticos nem sempre são conclusivos, é possível afirmar que o cenário ETA01 representa o cenário das chuvas observadas. Os resultados das análises e dos testes aplicados nas estações outono, inverno e primavera, encontram-se respectivamente nos Apêndices 06, 07 e 08 desta dissertação.

Prosseguindo com a EDA, foram elaborados gráficos utilizando o método RAPS, conforme descrito no item 2. O RAPS foi aplicado com a intenção de identificar possíveis tendências tanto na série hidrológica, quanto nas séries geradas pelo modelo ETA. Os gráficos do método RAPS estão apresentados na sequência pela Figura 38, Figura 39 e Figura 40. Tais figuras representam os cenários OBS, ETA01 e ETA02, respectivamente.

Tal qual apresentado pelos diagramas RAPS para o trimestre verão (Figura 38, Figura 39 e Figura 40), os pontos mais baixos e elevados (picos e vales do gráfico) mostram alterações abruptas nas séries (pontos de alteração na média). Tais anos estão resumidos na Tabela 20 para o verão, estando os anos onde ocorrem tais alterações nas outras estações no Apêndice 05 desta dissertação.

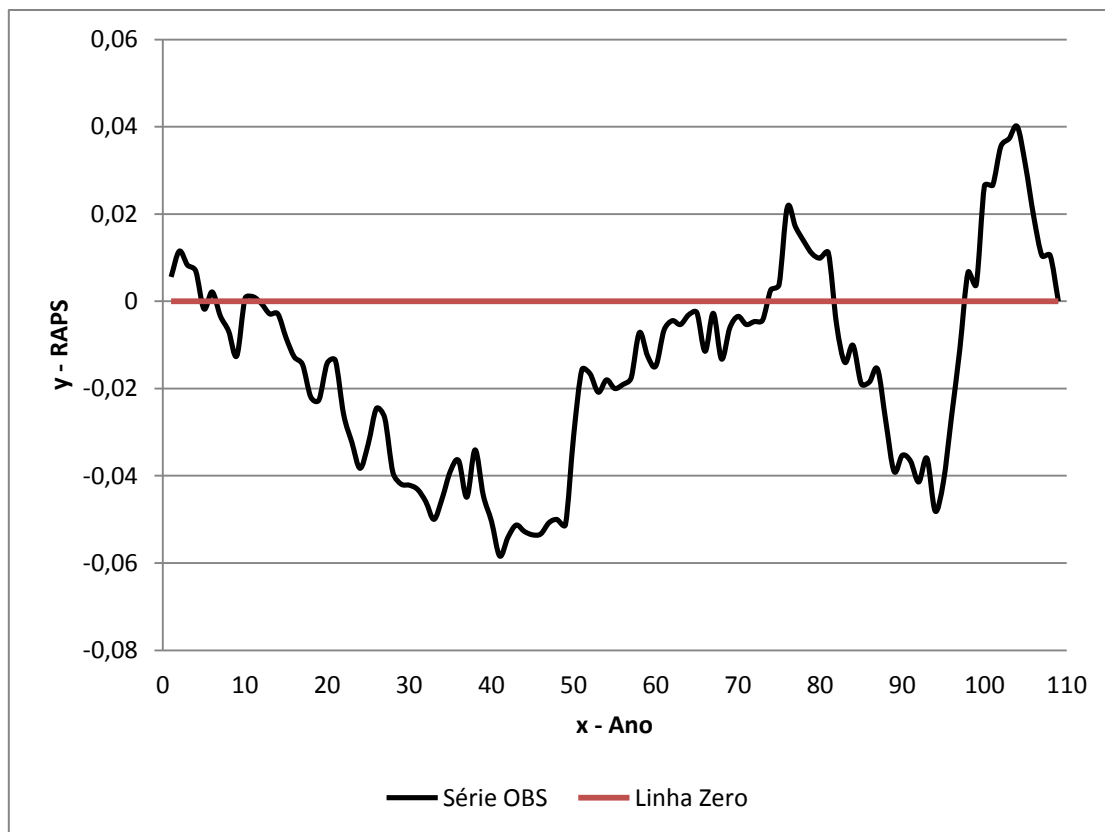


Figura 38 – RAPS dos totais trimestrais precipitados (verão – OBS) (Fonte: O Autor, 2014).

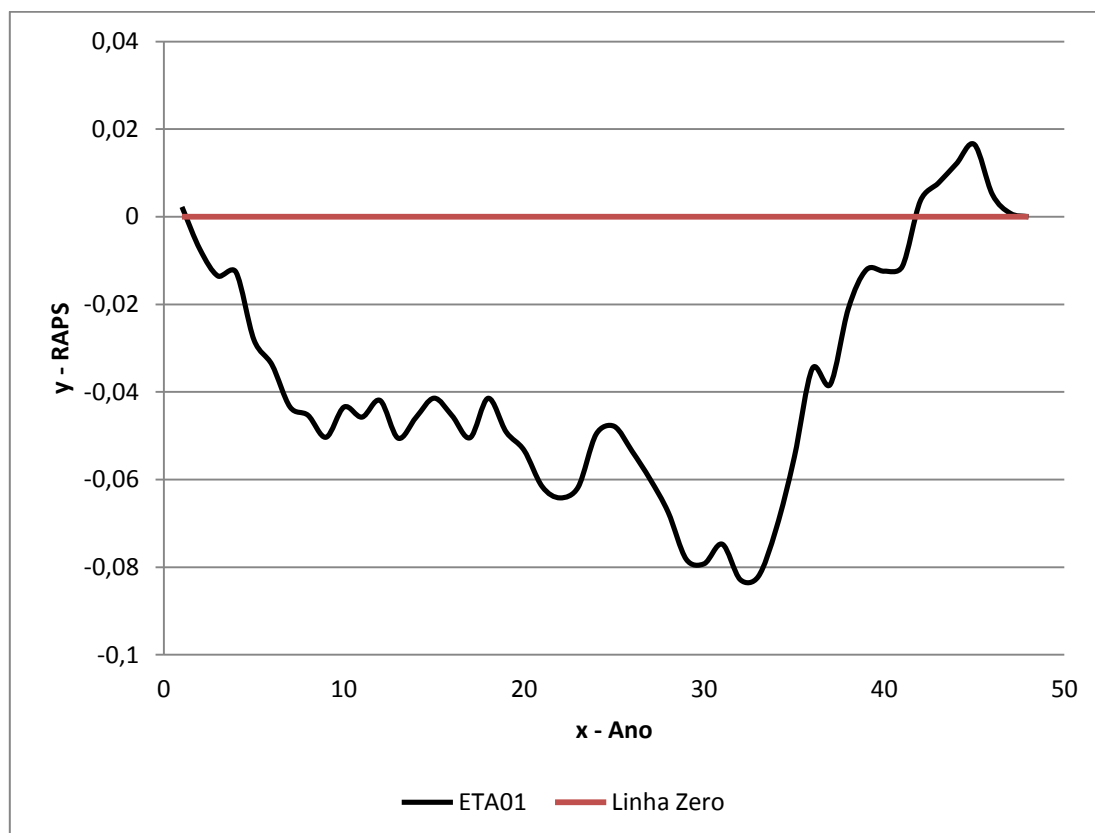


Figura 39 – RAPS dos totais trimestrais precipitados (verão – ETA01) (Fonte: O Autor, 2014).

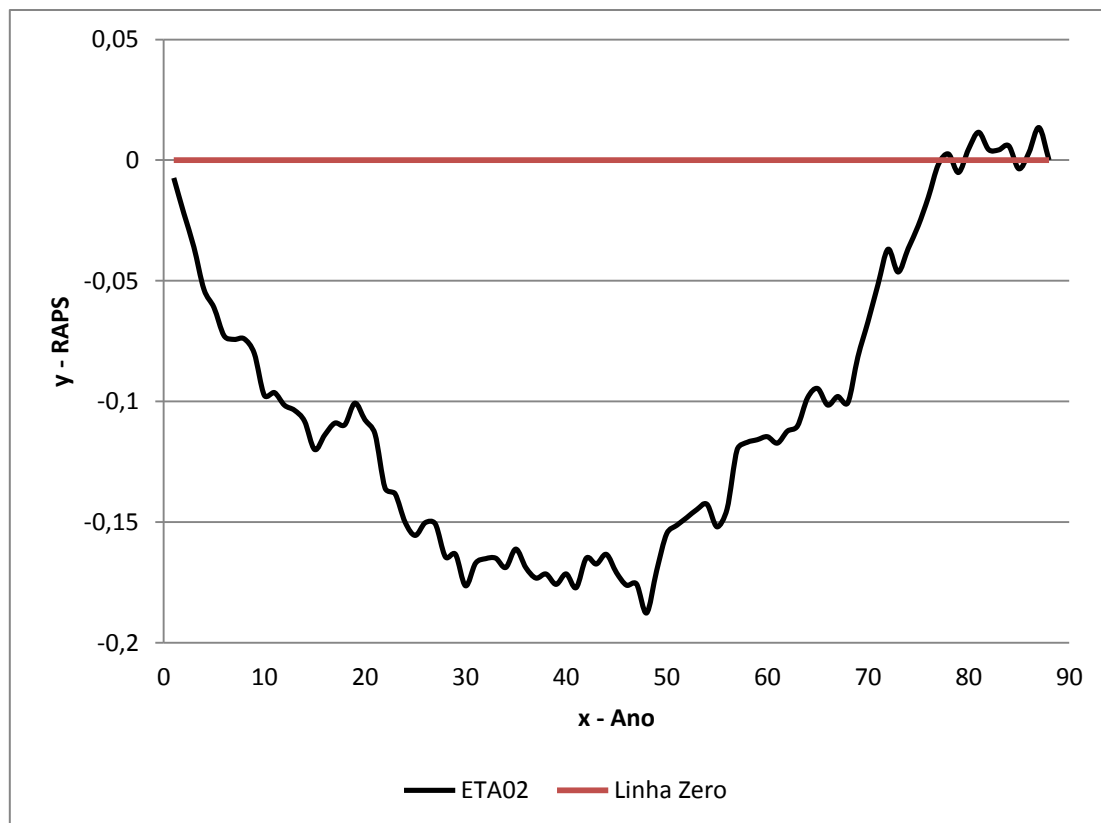


Figura 40 – RAPS dos totais trimestrais precipitados (verão – ETA02) (Fonte: O Autor, 2014).

Os diagramas RAPS das estações outono, inverno e primavera também são encontrados nos Apêndices 06, 07 e 08. Os anos de alterações abruptas identificados nos gráficos RAPS foram utilizados também na divisão das séries para a aplicação dos testes estatísticos, tais quais foram aplicados nas análises anteriores. Assim como nas análises anual e semestral, aqui foi observado que os coeficientes angulares das retas de regressão linear negativos acabam por gerar inversão nos gráficos RAPS (Apêndices 07 e 08).

Na Tabela 20, as colunas (Ano eq.) representam os anos equivalentes nos gráficos apresentados anteriormente. Os anos onde foram identificados como mais significativos para as análises (ponto de maior inversão no gráfico RAPS) foram destacados em laranja.

Primeiramente estão representados os resultados obtidos da análise visual dos gráficos RAPS. Na sequência, a análise “Divisão na Metade”, conforme realizado nos estudos de TOZZI (2014). Foram aplicados os testes estatísticos não paramétricos Mann Whitney (U) e rho de Spearman. Os testes

paramétricos não foram aplicados para a sazonalidade, pois não necessariamente se ajustam a uma distribuição normal.

Tabela 20 – Possíveis anos onde ocorreram alterações na média (Fonte: O Autor, 2014).

Método de Análise	OBS	Ano eq.	ETA01	Ano eq.	ETA02	Ano eq.
RAPS	1937	39	1983	23	2030	19
	1947	49	1993	33	2059	48
	1973	74	2005	45	2092	81
	1989	89	-	-	-	-
	2003	100	-	-	-	-
Divisão na Metade	1950	52	1985	25	2055	44

Os testes foram aplicados com o intuito de verificar o grau de significância destas alterações abruptas e identificar se estão ocorrendo tendências nos cenários OBS, ETA01 e ETA02. Os resultados dos testes aplicados para a estação verão estão sintetizados na Tabela 21. Os resultados numéricos dos testes, bem como outros resultados referentes às estações outono, inverno e primavera estão disponíveis nos Apêndices 05, 06, 07 e 08, desta dissertação.

Os resultados da Tabela 21 são interpretados como a quantidade de rejeições por aceite em cada um dos anos onde foram observadas alterações na média. Significa afirmar que no método RAPS em quase todas as divisões realizadas no cenário OBS, ocorreu nenhuma rejeição para dois aceites (0\_2). Já no método Divisão na Metade em 2055, no cenário ETA02, ocorreram duas rejeições para nenhum aceite (2\_0). Na Tabela 21 estão os resultados das aplicações dos testes Mann Whitney (U) e rho de Spearman.

Conforme os resultados da Tabela 21, no trimestre verão não ocorreram tendências na série hidrológica. Em OBS não foi observada tendência nas divisões realizadas segundo os dois métodos. Tal constatação ocorreu pelo fato do número de rejeições serem inferiores ao número de aceites em quase todos os casos, com exceção do ano de 2003 que o número de rejeições foi igual ao número de aceites.

No cenário ETA01 observa-se um número de rejeições maior em relação ao número de aceites da hipótese nula. São constatados três eventos de duas rejeições para nenhum aceite em 1983, 1985 e 1993. O mesmo critério de

desempate adotado nas análises anteriores (anual e semestral) foi adotado também na análise trimestral. Sendo assim, foi considerado que ocorre tendência nas séries em caso de empate, neste cenário em 2005 (número de rejeições *versus* número de aceites) (BUCHIR, 2013).

Tabela 21 – Resultados dos testes estatísticos U e rho (Divisão em cada ano onde foram observadas alterações na média) (Fonte: O Autor, 2014).

Quantidade de rejeições por aceite											
Método	RAPS										
Cenário	OBS					ETA01			ETA02		
Ano	1937	1947	1973	1989	2003	1983	1993	2005	2030	2059	2092
Resultado	0_2	0_2	0_2	0_2	1_1	2_0	2_0	1_1	1_1	2_0	2_0
Método	Divisão na Metade										
Cenário	OBS					ETA01			ETA02		
Ano	1950	-	-	-	-	1985	-	-	2055	-	-
Resultado	0_2	-	-	-	-	2_0	-	-	2_0	-	-
H0	Aceita					Rejeita			Rejeita		
Tendência	Não					Sim			Sim		

No cenário ETA02, são observados três eventos de duas rejeições para nenhum aceite nos anos 2055, 2059 e 2092 e uma rejeição para um aceite no ano de 2030. Também ocorreu um número de rejeições igual ao número de aceites em 2030, sendo adotado o critério de desempate, a presença de tendência na série. Com um número superior de rejeições em relação aos aceites, foi constatada que ocorrem tendências no cenário ETA02.

Com o intuito de consolidar os resultados obtidos nas análises anteriores, foi aplicado o teste de MKS para os totais precipitados trimestrais (Tabela 22). Também foram analisadas as chuvas médias, máximas e mínimas mensais para cada estação do ano com o intuito de obter uma melhor compreensão do padrão das precipitações sazonais. Na Tabela 22 estão apresentados apenas os resultados referentes à estação verão. Os demais resultados encontram-se nos Apêndices 06, 07 e 08 desta dissertação.

Para quase todas as situações estudadas no cenário OBS, a hipótese nula é aceita para um nível de significância 5%. Apenas as chuvas máximas de outono é que tiveram a hipótese nula  $H_0$  rejeitada. Sendo assim, vale afirmar que não ocorrem tendências em todas as estações no período histórico, de



acordo com os resultados do teste de MKS. O cenário ETA01 apresenta um comportamento diferente quanto à análise das chuvas trimestrais.

Tabela 22 – Análise das precipitações trimestrais (verão) - Mann Kendall Sazonal ( $\alpha = 5\%$ )  
Aceita  $H_0$ :  $Z(\text{tab.}) = 1,96$  (Fonte: O Autor, 2014).

Período	Análise	OBS	ETA01	ETA02
		Situação	Situação	Situação
Verão	Total	Aceita $H_0$	Rejeita $H_0$	Rejeita $H_0$
	Máx.	Aceita $H_0$	Rejeita $H_0$	Rejeita $H_0$
	Mín.	Aceita $H_0$	Aceita $H_0$	Rejeita $H_0$
	Méd.	Aceita $H_0$	Rejeita $H_0$	Rejeita $H_0$
H0		Rejeita	Rejeita	Rejeita
Tendência		Sim	Sim	Sim

Com exceção das chuvas mínimas de verão e do trimestre outono (totais precipitados, chuvas máximas, mínimas e médias), o restante das análises trimestrais para o cenário ETA01 obtiveram a hipótese  $H_0$  rejeitada. Este número de rejeições indicou a presença de tendências em quase todas as estações do ano, com exceção do trimestre que compreende o outono.

Porém uma peculiaridade interessante é que o cenário ETA02 apresentou tendências apenas para as chuvas do verão. Não apresenta tendências em nenhuma outra estação do ano. A análise foi realizada rejeitando as hipóteses de  $H_0$  quando o módulo dos resultados do  $Z_{calc}$  foi superior a 1,96.

Conclui-se da análise trimestral pelo teste de MKS, que as chuvas apresentam uma tendência para quase todas as estações do cenário ETA01. Para os cenários OBS e ETA02, a aplicação do teste MKS, mostrou que não ocorrem tendências na série hidrológica e apenas o trimestre verão do cenário ETA02 apresentou tendência.

Portanto, agrupando os resultados obtidos nas análises trimestrais é visível que estão ocorrendo tendências nas séries de verão geradas pelo modelo ETA. Para as outras estações os resultados se mostraram como inconclusivos. Mais pode ser visto nos Apêndices 05, 06, 07 e 08 deste trabalho, assim como os resultados numéricos dos testes.

Na estação verão, é observada uma tendência de crescimento (positiva) através da análise dos coeficientes das retas de regressão linear (Tabela 19) e também das estatísticas descritivas (Tabela 17). Porém a análise dos coeficientes das retas de regressão linear e aplicação dos testes não paramétricos tais quais descritos no item 2, não apresentaram tendências conclusivas.

Com o intuito de refinar os resultados obtidos na análise das chuvas anuais, semestrais e trimestrais, o mesmo estudo foi realizado utilizando as chuvas mensais. Mais é visto no próximo subitem.

### 5.2.3. Análise Mensal

Para finalizar a análise sazonal, realizou-se uma análise mensal de maneira análoga ao que foi feito nas análises anual, semestral e trimestral. Primeiramente foram calculadas as estatísticas descritivas das precipitações mensais. A Tabela 23 apresenta as estatísticas dos totais mensais precipitados. Tais estatísticas foram calculadas para os cenários de precipitação OBS, ETA01 e ETA02.

Tabela 23 – Estatísticas descritivas dos totais mensais precipitados (Fonte: O Autor, 2014).

Estatísticas	OBS	ETA01	ETA02
N	564	576	1055
Média	122,48	123,36	149,27
Mediana	114,35	114,09	140,58
$\sigma$	76,29	76,62	80,60
Ex. Curtose	1,48	1,24	0,46
Assimetria	1,00	0,91	0,66
Min	2,00	0,25	2,16
Max	473,80	498,71	459,79

De maneira semelhante ao que ocorreu nas outras análises, através dos indicadores estatísticos, observou-se que o cenário ETA01 representou bem as chuvas observadas (Tabela 23). Todos os indicadores estatísticos para OBS e ETA01 apresentaram valores próximos para as chuvas mensais que compreendem o período de janeiro de 1961 a dezembro de 2008.

Na Tabela 23, observou-se que o cenário ETA02 apresentou uma suave elevação na média e mediana, sendo possível constatar uma tendência de crescimento (positiva). Tanto as chuvas máximas, quanto as mínimas são bem representadas comparando os cenários OBS e ETA01, e também o ETA02, visto que este representa o período futuro da série simulada. Os outros indicadores estatísticos não apresentaram desvios consideráveis, mostrando uma boa representação dos cenários do ETA.

Na sequência estão os gráficos das regressões lineares e LOWESS e das funções suavizadoras (média e mediana móveis de 10 anos), conforme é explicado no item 2. A representação dos diagramas encontra-se na Figura 41, Figura 42 e Figura 43.

Vale ressaltar que para a construção dos gráficos, foi considerada uma escala de equivalência, sendo na série observada o ano 1 equivalente ao 1889, no cenário ETA01 ao ano 1961 e no cenário ETA02 ao ano 2012. As falhas foram desconsideradas do estudo. Tal consideração de equivalências foi realizada nas análises anteriores (anual, semestral e trimestral).

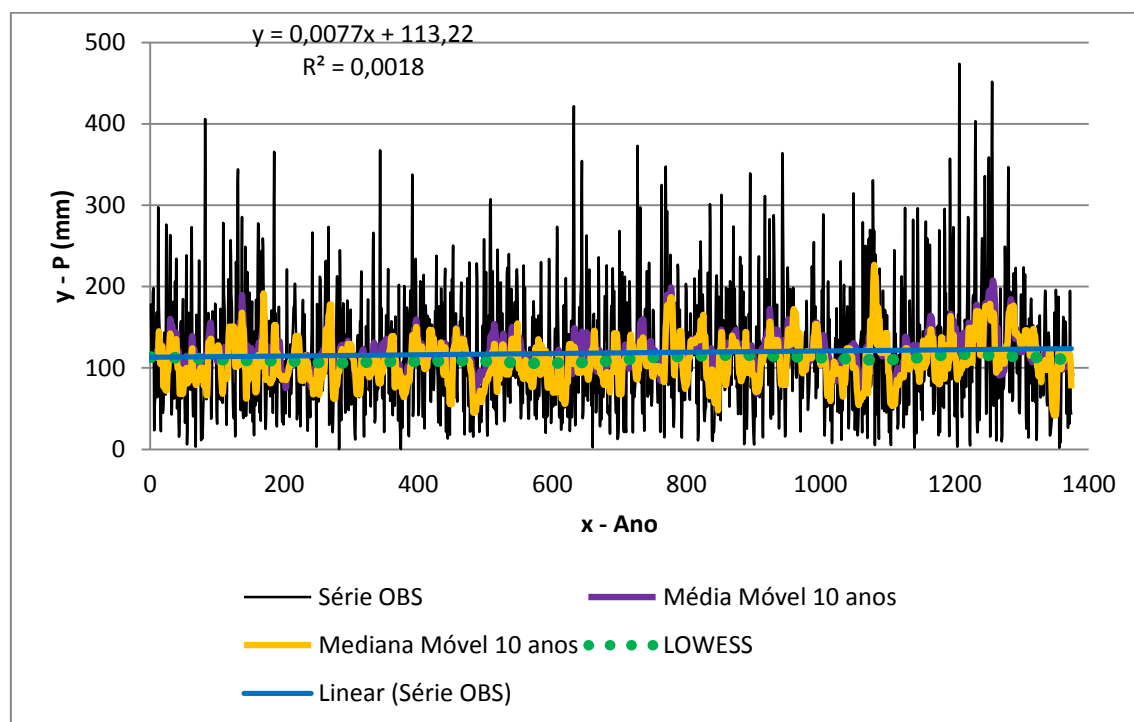


Figura 41 – Gráficos dos totais mensais precipitados em OBS (Fonte: O Autor, 2014).

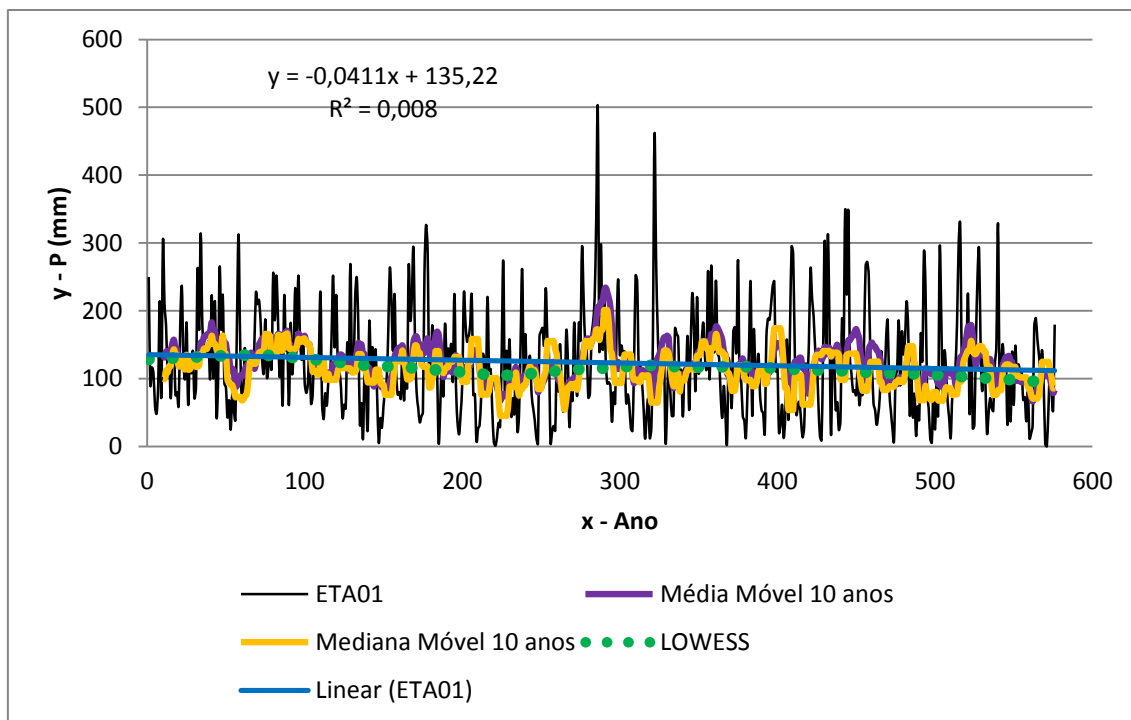


Figura 42 – Gráficos dos totais mensais precipitados em ETA01 (Fonte: O Autor, 2014).

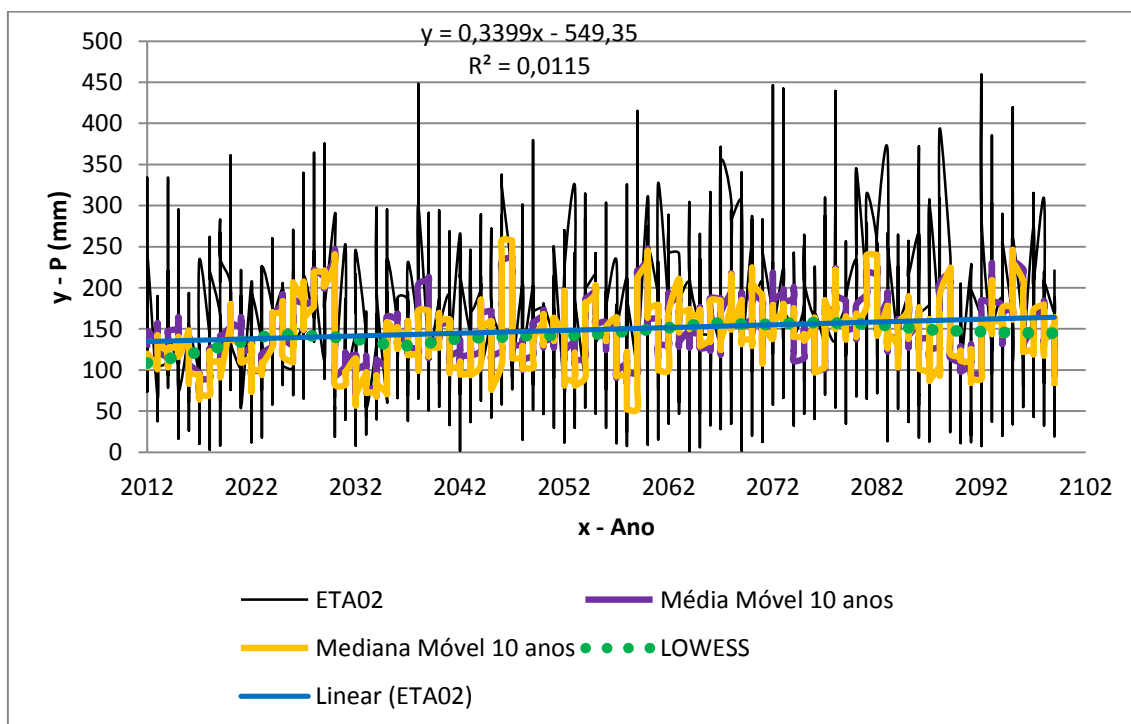


Figura 43 – Gráficos dos totais mensais precipitados em ETA02 (Fonte: O Autor, 2014).

Dos diagramas representados pela Figura 41, Figura 42 e Figura 43, é visível que ocorre uma suave tendência de crescimento (positiva) nas séries de OBS e ETA02. O mesmo não ocorreu na análise do cenário ETA01, que

pareceu ter uma tendência de caimento (negativa). Tal constatação ocorreu pela análise da reta de regressão linear e da regressão LOWESS, assim como das funções suavizadoras. Estas últimas tendem a suavizar os valores das séries, aproximando-os à reta de regressão linear. Sendo assim, na Tabela 24 encontram-se as equações de regressão linear com seus respectivos coeficientes de determinação para as chuvas mensais.

Tabela 24 – Equações de regressão linear para os totais mensais precipitados (Fonte: O Autor, 2014).

Equações de Regressão Linear	OBS	ETA01	ETA02
	$y = 0,0077x + 113,22$	$y = -0,0411x + 135,22$	$y = 0,3399x - 549,35$
$R^2$	0,0018	0,0080	0,0115

Os coeficientes angulares das retas de regressão linear apontam uma tendência crescente ao longo dos cenários OBS e ETA02, visto que o coeficiente angular destas retas é positivo. Para o cenário ETA01, o coeficiente angular apresenta uma tendência negativa. O maior valor do coeficiente angular dos três cenários é o referente ao cenário ETA02.

Conforme foi realizado nas análises anual, semestral e trimestral os coeficientes angulares das retas de regressão linear foram testados e os resultados estão na Tabela 25. A hipótese nula, dado um nível de significância  $\alpha = 5\%$  é de que  $H_0: b = 0$ , sendo  $b$  o coeficiente angular da reta de regressão linear (amplamente descrito no item 2).

Tabela 25 – Resultado do teste de hipótese do coeficiente angular da reta de regressão linear (Fonte: O Autor, 2014).

Cenário	t	t (tab.)	Resultado	Tendência
OBS	1,5729	1,9617	Aceita $H_0$	Não
ETA01	2,1515	1,9641	Rejeita $H_0$	Sim
ETA02	3,5000	1,9623	Rejeita $H_0$	Sim

De acordo com os testes empregados a série que não apresenta tendência na análise mensal é a do cenário OBS. As outras, segundo a aplicação do teste do coeficiente angular da reta de regressão linear, apresentaram a rejeição da hipótese nula de  $H_0$ . Confirmou-se que as séries

ETA01 e ETA02 apresentaram tendências. Tendências decrescentes devido ao valor negativo do coeficiente angular da reta referente ao cenário ETA01 e tendências crescentes devido ao valor positivo do coeficiente angular da reta referente ao cenário ETA02 (Tabela 24).

Prosseguindo com a EDA, foram elaborados gráficos utilizando a técnica RAPS, conforme descrita no item 2. A RAPS foi aplicada com a intenção de identificar possíveis tendências tanto na série hidrológica, quanto nas séries geradas pelo modelo ETA. Os gráficos do método RAPS, estão apresentados na sequência pela Figura 44, Figura 45 e Figura 46. Tais figuras representam os cenários OBS, ETA01 e ETA02, respectivamente.

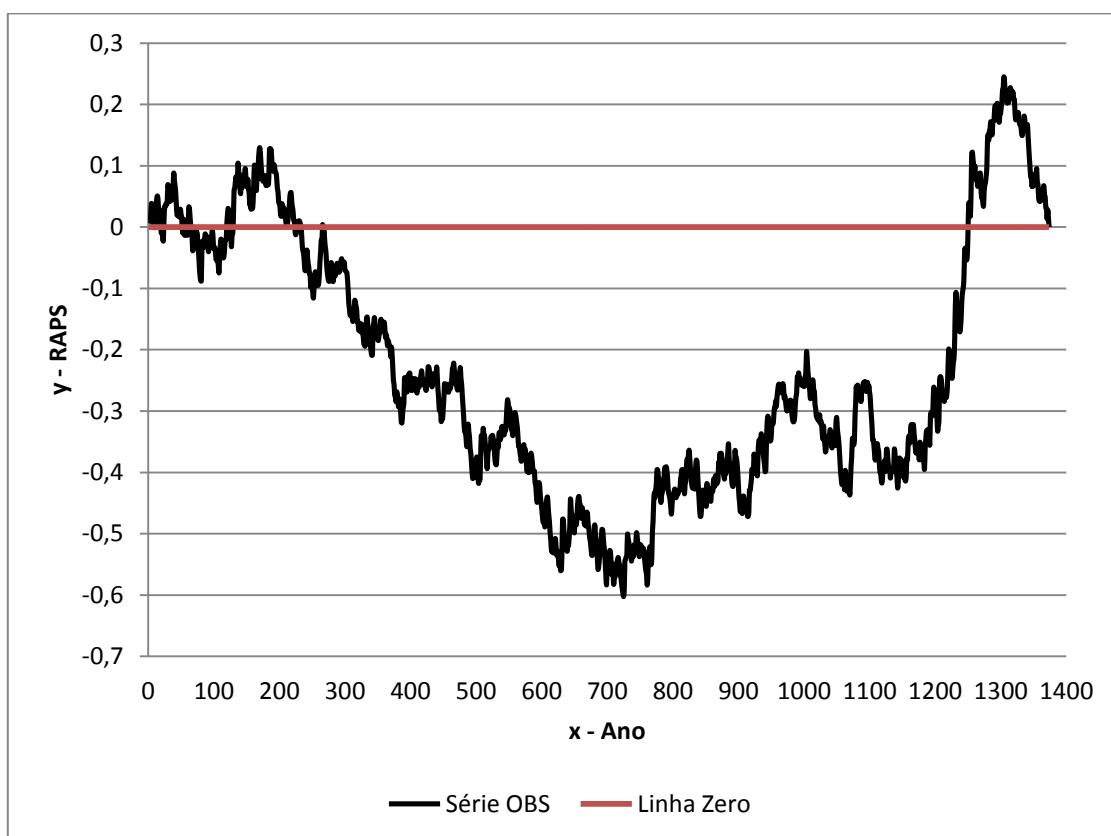


Figura 44 – RAPS dos totais mensais precipitados (OBS) (Fonte: O Autor, 2014).

Tal qual apresentado pelos diagramas RAPS das chuvas mensais (Figura 44, Figura 45 e Figura 46), os pontos mais baixos e elevados (picos e vales do gráfico) mostram alterações abruptas nas séries (pontos de alteração na média). Tais anos estão sintetizados na Tabela 26.

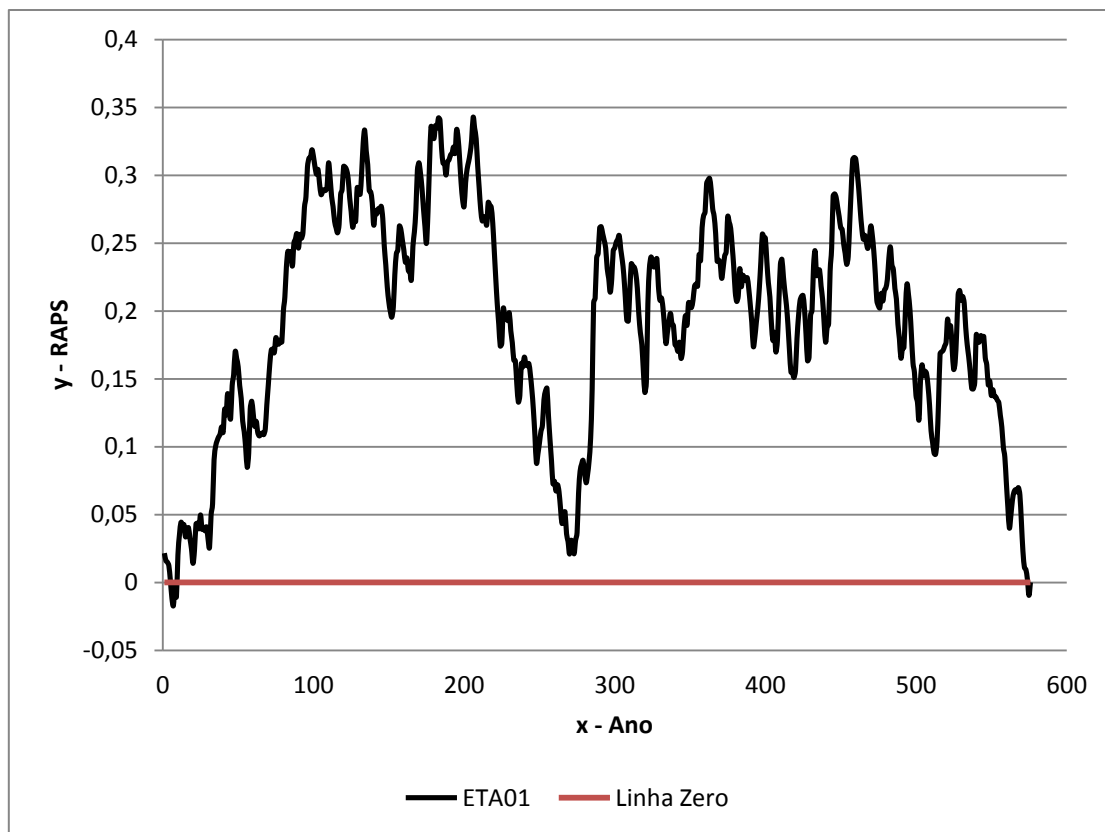


Figura 45 – RAPS dos totais mensais precipitados (ETA01) (Fonte: O Autor, 2014).

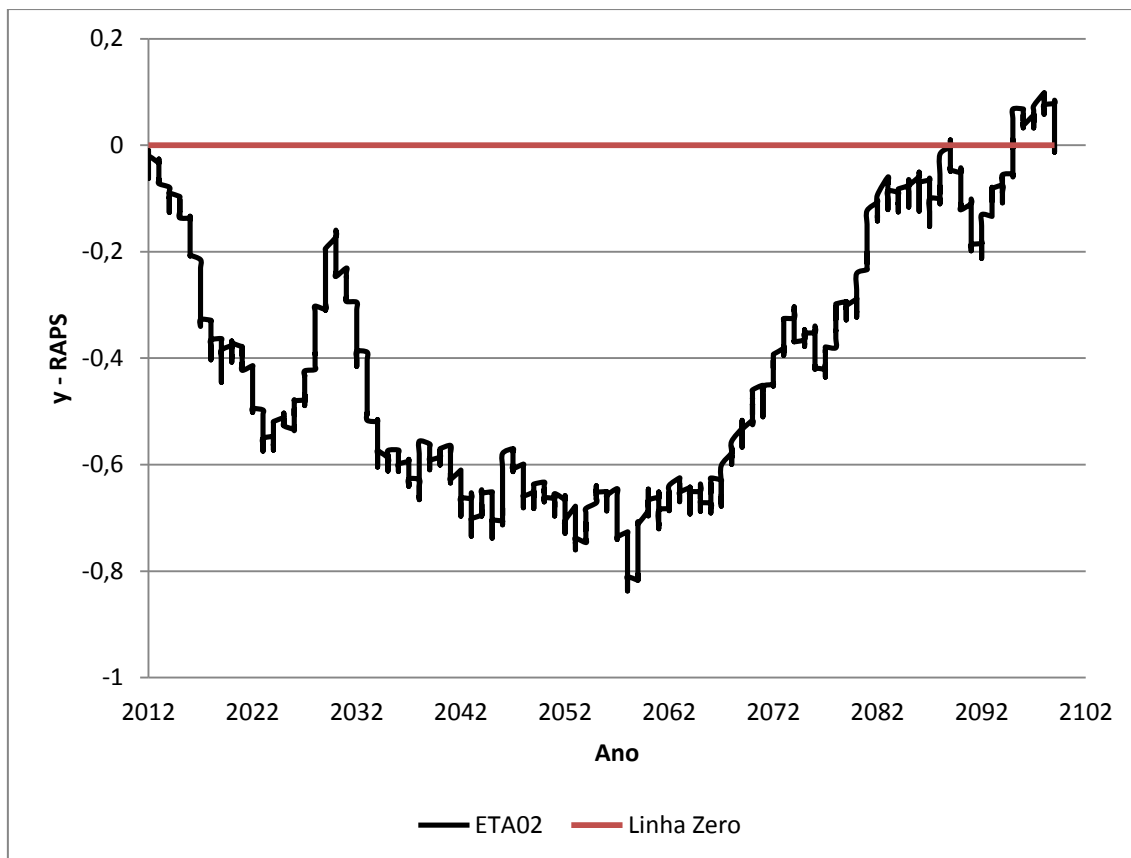


Figura 46 – RAPS dos totais mensais precipitados (ETA02) (Fonte: O Autor, 2014).

Da mesma forma como foi identificado nas análises anual, semestral e trimestral, observou-se que os coeficientes angulares das retas de regressão linear negativos acabam por gerar inversão nos gráficos RAPS.

De maneira análoga ao realizado nas análises anteriores, foram aplicados testes estatísticos nos anos onde foram visíveis alterações nas médias. Na Tabela 26 estão representados primeiramente os resultados obtidos da análise visual dos gráficos da curva acumulativa (tal como realizado na análise anual) e dos gráficos RAPS. Por último, foi realizada a “Divisão na Metade”, de acordo com os estudos de TOZZI (2014).

Na Tabela 26, as colunas (Ano eq.) representam os anos equivalentes nos gráficos apresentados anteriormente. Os anos onde foram identificados como mais significativos para as análises (ponto de maior inversão no gráfico RAPS) foram destacados em laranja.

Tabela 26 – Possíveis anos onde ocorreram alterações na média (Fonte: O Autor, 2014).

Método de Análise	OBS	Ano eq.	ETA01	Ano eq.	ETA02	Ano eq.
RAPS	1905	14	1970	10	2023	12
	1953	55	1973	13	2030	19
	1977	78	1975	15	2058	47
	1981	82	1983	23	2092	81
	2003	100	1992	32	2095	84
	-	-	1995	35	-	-
	-	-	1999	39	-	-
	-	-	2003	43	-	-
Divisão na Metade	1950	52	1985	25	2055	44

Na sequência foram aplicados os teste estatísticos de Mann-Whitney e do coeficiente rho de Spearman. Ambos foram aplicados com o intuito de verificar o grau de significância destas alterações abruptas e identificar se ocorrem tendências nos cenários OBS, ETA01 e ETA02. Os resultados de todos os testes aplicados para as precipitações mensais estão sintetizados na Tabela 27. Os resultados numéricos dos testes estão disponíveis no Apêndice 09, desta dissertação.



Os resultados da Tabela 27 são interpretados como a quantidade de rejeições por aceite em cada um dos anos onde foram observadas alterações na média. Significa afirmar que no método RAPS em 1905, cenário OBS, ocorreu uma rejeição para um aceite (1\_1). Já no método Divisão na Metade em 2055, no cenário ETA02, ocorreram duas rejeições para nenhum aceite (2\_0).

De acordo com os resultados da Tabela 27, em todos cenários foi observada a presença de tendências. O número de rejeições da hipótese  $H_0$  foi superior ao número de aceites em OBS, ETA01 e ETA02. A análise das chuvas mensais apresentou um comportamento mais tendencioso que as análises anteriores. Em OBS ocorreu apenas para o ano de 1905 um número de rejeições igual ao de aceites, para o método RAPS.

Tabela 27 – Resultados dos testes estatísticos U e rho (Divisão em cada ano onde foram observadas alterações na média) (Fonte: O Autor, 2014).

Quantidade de rejeições por aceite												
Método	RAPS											
Cenário	OBS				ETA01				ETA02			
Ano	1905	1953	1977	1981	1970	1973	1975	1983	2023	2058	2092	2095
Resultado	1_1	2_0	2_0	2_0	2_0	2_0	2_0	1_1	1_1	2_0	2_0	2_0
Método	Divisão na Metade											
Cenário	OBS				ETA01				ETA02			
Ano	1950	-	-	-	1985	-	-	-	2055	-	-	-
Resultado	2_0	-	-	-	1_1	-	-	-	2_0	-	-	-
H0	Rejeita				Rejeita				Rejeita			
Tendência	Sim				Sim				Sim			

No cenário ETA01 apenas em 1970, 1973, 1975 e 1982 são observados mais aceites em relação ao número de rejeições. Nos anos de 1983, 1985, 1995, 1999 e 2003 ocorre uma rejeição para um aceite. O mesmo critério de desempate adotado nas análises anteriores (anual, semestral e trimestral) foi adotado também na análise mensal. Sendo assim, foi considerada a ocorrência de tendência nas séries em caso de empate (número de rejeições *versus* número de aceites) (BUCHIR, 2013). Nos demais casos ocorreram um número maior de rejeições da hipótese  $H_0$ , indicando a presença de tendências.

No cenário ETA02, são observadas mais rejeições em relação ao número de aceites e também o empate. Isto ocorreu nos anos 2055, 2058,

2092 e 2095, para o método RAPS. Foi adotado o critério de desempate (tendência). Com um número superior de rejeições em relação aos aceites, foi constatada que ocorrem tendências no cenário ETA02. Com o intuito de consolidar os resultados obtidos nas análises anteriores, foi aplicado o teste de MKS para os totais mensais precipitados (Tabela 28).

A aplicação do teste de MKS para as séries mensais permite observar que ocorrem tendências para os cenários do modelo ETA e não ocorre tendência para as chuvas observadas. A análise foi realizada de maneira análoga as anteriores, rejeitando as hipóteses de  $H_0$  quando o módulo dos resultados do  $Z_{calc}$  foi superior a 1,96. Os resultados da aplicação do teste de MKS encontram-se no Apêndice 09 deste trabalho.

Tabela 28 – Análise das precipitações mensais - Mann Kendall Sazonal ( $\alpha = 5\%$ ) Aceita  $H_0$ :  $Z(tab.) = 1,96$  (Fonte: O Autor, 2014).

Período	Análise	OBS	ETA01	ETA02
		Situação	Situação	Situação
Mensal	Total	Aceita $H_0$	Rejeita $H_0$	Rejeita $H_0$
$H_0$		Rejeita	Rejeita	Rejeita
Tendência		Sim	Sim	Sim

Portanto, agrupando os resultados obtidos na análise mensal é visível que estão ocorrendo tendências nas séries mensais geradas pelo modelo ETA. Com a análise do coeficiente angular da reta de regressão linear (Figura 43), se observa uma tendência de crescimento (positiva) em ETA02. O mesmo é confirmado pela aplicação dos testes (Tabela 25).

Por fim, é possível concluir que não ocorrem tendências significativas na série histórica observada e que são visíveis tendências nas séries geradas pelo modelo ETA. Para se chegar a resultados mais conclusivos sobre tais constatações, foi necessário reduzir a escala da análise, para verificar se estas ocorrem e se estão condicionadas a determinadas épocas do ano. Através da análise dos totais anuais precipitados, foi possível identificar que ocorre tendência negativa em alguns testes para o cenário ETA01.

Para o cenário ETA02, foi observado que ocorrem tendências de acréscimo. Mas, analisando os totais precipitados nas análises semestrais e trimestrais, foi possível identificar em quais épocas do ano estão ocorrendo

tendências de acréscimo/decrécimo nas chuvas. Constatou-se que nas épocas mais frias do ano as chuvas do cenário ETA01 apresentam tendências negativas e que nas épocas mais quentes, apresentaram tendências positivas. A análise mensal apenas evidenciou a presença de tendências.

### 5.3. Resultado das Análises

Os resultados de todas as análises estão sintetizados na Tabela 29. Conforme havia sido constatado anteriormente, ocorrem tendências quanto à aplicação de alguns testes e análises gráficas e dos indicadores estatísticos, para todos os cenários em estudo. Porém na série observada não foi constatada uma tendência de acréscimo quanto às análises anual e trimestrais de inverno e primavera, visto que apenas duas análises evidenciaram a presença de tendências no cenário OBS.

Tabela 29 – Resultados de todas as análises (Fonte: O Autor, 2014).

Estação	Período	OBS	ETA01	ETA02
ANUAL	–	↑ (2) (3)	↓ Todos	↑ Todos
SEM – Verão	NOV – ABR	↑ (2) (3) (6)	↑ Todos	↑ Todos
SEM – Inverno	MAI – OUT	↑ (2) (3) (6)	↓ Todos	↑ (1) (2) (3) (6)
TRIM – Verão	DEZ – FEV	↑ (2) (3) (6)	↑ Todos	↑ (1) (2) (3) (5) (6)
TRIM – Outono	MAR – MAI	↑ (2) (3) (5) (6)	↑ (2) (3) (6)	↑ (1) (2) (3) (4) (6)
TRIM – Inverno	JUN – AGO	↑ (2) (3)	↓ Todos	↑ (1) (2) (3)
TRIM – Primavera	SET – NOV	↑ (2) (3)	↓ Todos	↑ (1) (2) (3)
Mensal	–	↑ (2) (3) (5) (6)	↓ Todos	↑ Todos
(1)	Estatísticas descritivas			
(2)	Funções e regressões			
(3)	Coeficiente angular da reta			
(4)	Teste do coeficiente angular da reta			
(5)	Testes U e rho			
(6)	Teste MKS			
Exceções	Exceto pelas estatísticas máximas que foram superiores (em relação à OBS)			
	Exceto pelas estatísticas máximas que foram inferiores (em relação à OBS)			
	Estatísticas descritivas (todas abaixo em relação à OBS)			

No cenário OBS é visto que as tendências de acréscimo se concentram nas estações correspondentes aos meses mais quentes, pois mais análises apontaram tendências positivas (crescentes) neste cenário.

Quanto ao cenário ETA01, é visível que ocorrem tendências negativas (decrecentes) nos meses que correspondem aos meses mais frios do ano, quanto à aplicação de quase todos os métodos. Para os meses que representam o período mais quente, o cenário ETA01 aponta um acréscimo nas precipitações na maioria dos testes aplicados. Algumas exceções foram encontradas quanto à análise do cenário ETA01 e estas foram discriminadas ao final da Tabela 29.

Conforme a Tabela 29, é visto que ocorrem tendências de acréscimo (positivas) em quase todos os testes e análises aplicados para o cenário ETA02. O ano onde ocorre a inflexão da Curva Cumulativa em função do tempo corresponde ao ano de 2056. Tal inflexão na curva aponta possíveis tendências de acréscimo nas chuvas em Curitiba neste ano (de acordo com o cenário ETA02 e considerando as incertezas dos RCM).

#### 5.4. Resumo do Capítulo

Neste capítulo foi realizada a análise dos cenários de precipitação gerados pelo modelo ETA e do cenário de chuvas observadas na estação hidrológica Curitiba. Inicialmente foi realizada uma análise anual dos cenários de precipitação, de acordo com os métodos propostos no item 2.

Na sequência foi realizada uma análise sazonal, as chuvas mensais foram agrupadas em semestres e trimestres. Finalmente foram analisadas as chuvas mensais. Todas as análises foram realizadas, tal qual foi feito na análise anual, e foram utilizados todos os métodos propostos no item 2.

Na divisão em duas estações, a estação verão consiste nas séries de chuva que compreendem o período de novembro a abril. Logo as séries de inverno compreendem o período de maio a outubro.

As chuvas trimestrais compreendem os meses das estações do ano: Verão (dezembro a fevereiro), Outono (março a maio), Inverno (junho a agosto)

e Primavera (setembro a novembro). Para todas as análises foi observado o total precipitado no período.

Reduzindo a escala da análise em semestres, depois em trimestres e finalmente em meses, foi possível detectar que estão ocorrendo tendências de acréscimo das chuvas e estas se concentram no verão e meses próximos.

## CONCLUSÕES

As análises realizadas tanto no período histórico, quanto no período futuro, permitiram concluir que os cenários gerados pelo modelo ETA apresentam resultados melhores para a região de Curitiba. As análises iniciais indicaram que para os três RCM estudados (ETA, PROMES e RCA1) o modelo ETA apresentou simulações mais consistentes em relação aos outros, e com base neste modelo foram realizados estudos de projeções futuras.

O cenário ETA01, representado pelas chuvas simuladas no período histórico (1961-2008) apresentou uma ligeira tendência decrescente (negativa) nas precipitações geradas pelo ETA01. Tal tendência decrescente foi constatada através da análise anual e das análises sazonais das chuvas em Curitiba. Pela análise sazonal verificou-se que ocorrem tendências negativas nos meses que compreendem os períodos mais frios dos anos.

Já o cenário ETA02, representado pelas precipitações simuladas no período futuro (2012-2099), apontou uma ligeira tendência de acréscimo (positiva) nas precipitações geradas pelo ETA02. Tal tendência de acréscimo foi constatada através da análise anual e das análises sazonais das chuvas em Curitiba (praticamente todos os testes).

Conclui-se da análise anual, que as chuvas apresentam uma tendência crescente para alguns dos testes aplicados. A tendência é observada como positiva através do diagrama “Curvas Cumulativas”, da análise dos coeficientes das retas de regressão linear e também das estatísticas descritivas.

Foi apresentada uma sazonalidade definida quanto aos dados observados e aos valores obtidos pelas simulações dos RCM. Tanto no período histórico, quanto no período futuro, houve uma variação sazonal das chuvas. Independente da divisão das séries ter ocorrida em semestres, trimestres ou simplesmente ter-se realizado a análise mensal, houve variação nas chuvas nos registros históricos, assim como nas simulações do modelo ETA.

Na análise semestral, as séries foram divididas em duas estações, conforme realizou TOZZI (2014), em verão e inverno, onde são mais predominantes chuvas convectivas e frontais, respectivamente. Verificou-se a

presença de tendências positivas nas séries de chuvas da estação verão, sendo que na estação inverno os resultados não se mostraram conclusivos.

Na análise trimestral (estações do ano), foi observada a presença de tendências mais significativas na estação verão. Nas outras estações não foram encontradas tendências significativas, utilizando a aplicação dos testes, conforme apresentado nos capítulos anteriores. Por isso, para uma melhor compreensão dos resultados, foi realizada uma análise mensal, que mostrou tendências na série histórica e futura gerada pelo modelo ETA.

Sintetizando os resultados, o modelo ETA apresentou os resultados melhores para a análise de tendências do regime de chuvas em Curitiba. As chuvas geradas por esse modelo apresentaram um acréscimo nas precipitações mensais em torno de 18% a partir de 2012. Entretanto, quando se compara este valor com as incertezas dos RCM, conclui-se que se trata apenas de um indicativo de aumento nas precipitações em Curitiba até o final do século XXI.

De acordo com o relatório do IPCC (2013), também é visto que estão ocorrendo tendências de acréscimo para o cenário futuro (representado pelo cenário ETA02, neste trabalho). Com base nos dados gerados por este RCM é possível prever que ocorrerá um acréscimo nas chuvas da região e assim tomar medidas preventivas quanto à gestão e planejamento dos recursos hídricos.

## RECOMENDAÇÕES

Em função dos resultados obtidos neste trabalho, no contexto de mudanças climáticas e alterações nos regimes hidrológicos, algumas considerações são realizadas, quanto ao estudo das precipitações nos arredores da capital paranaense.

Para os estudos futuros de análises de tendências, recomenda-se utilizar as simulações do modelo ETA para realizar previsões em Curitiba. O cenário gerado pelo modelo PROMES não mostrou resultados satisfatórios nas análises iniciais, pois sobrepujam os resultados das análises gráficas e estatísticas. Já os três cenários do modelo RCA1 se mostraram um pouco mais satisfatórios.

É recomendado que o mesmo estudo seja aplicado para as séries geradas pelo modelo RCA1, para identificar qual das séries do RCA1 representa melhor a RMC. Assim será possível decidir sobre qual cenário é o mais apropriado para representar a capital do estado do Paraná nos estudos, seja o gerado pelo ETA ou pelo RCA1.

Recomenda-se também que este estudo seja realizado em outras regiões brasileiras, com o intuito de verificar se existe um padrão de alterações em função da localização. Aplicando as técnicas deste estudo em modelos regionais permite assim uma melhor generalização.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEMAW, B. F.; CHAOKA, T. R. Trends in the flow regime of the Southern African rivers as visualized from Rescaled Adjusted Partial Sums (RAPS). **African Journal of Science and Technology**, v. 3, n. 1, p. 69–78, 2002.

ALEXANDRE, G. R. Estudo para identificação de tendências do regime pluvial na região metropolitana de Belo Horizonte a partir de métodos estatísticos e modelos climáticos. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

ALEXANDRE, G. R.; BAPTISTA, M. B.; NAGHETTINI, M. Estudo para Identificação de Tendências do Regime Pluvial na Região Metropolitana de Belo Horizonte a Partir de Métodos Estatísticos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, p. 115–126, 2010.

AZEVEDO, D. C. Chuvas no Brasil: regime, variabilidade e probabilidades de alturas mensais e anuais. **Dissertação de Mestrado**. UFRGS, 1974.

AZEVEDO, L. C. DE; NERY, J. T.; ANDRADE, A. R. DE. **Análise da precipitação pluviométrica na bacia do rio Iguaçu**. p. 15, 2006.

BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717–726, 2001.

BARROS, V.; CLARKE, R.; DIAS, P. S. **Climate change in the La Plata Basin**. Inter American Institute on Global Change, 2011. p. 221

BARROS, V. R.; GONZALEZ, M.; LIEBMANN, B.; CAMILLONI, I. Influence of the South Atlantic convergence zone and South Atlantic Sea surface temperature on interannual summer rainfall variability in Southeastern South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 67, p. 123–133, 2000.

BATISTA, A. L.; JÚNIOR, S. A. F.; DETZEL, D. H. M.; MINE, M. R. M.; FILL, H. D. O. A.; FERNANDES, C. F.; KAVISKI, E. Verificação da estacionariedade de séries hidrológicas no Sul-Sudeste do Brasil. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, n. 41, p. 1–19, 2009.

BERG, P.; FELDMANN, H.; PANITZ, H. J. Bias correction of high resolution regional climate model data. **Journal of Hydrology**, v. 448-449, p. 80–92, jul. 2012.

BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale ETA Model: Description and forecast examples. **Weather and Forecasting**, p. 265–278, 1994.

BLAIN, G. C. Considerações estatísticas relativas a seis séries mensais de temperatura do ar da secretaria de agricultura e abastecimento do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 279–296, 2011.

BORMANN, H.; PINTER, N.; ELFERT, S. Hydrological signatures of flood trends on German rivers: Flood frequencies, flood heights and specific stages. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1-2, p. 50–66, jun. 2011.

BRIN, M.; STUCK, G. Introduction to Dynamical Systems. **Cambridge University Press, Cambridge, UK**. 2002.

BUCHIR, L. M. S. T. Análise da influência de mudanças climáticas nas precipitações. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná, 2013.

BUISHAND, T. A. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. **Journal of Hydrology**, v. 73, p. 51–69, 1984.

CISLAGHI, M.; MICHELE, C.; GHEZZI, A.; ROSSO, R. Statistical assessment of trends and oscillations in rainfall dynamics: Analysis of long daily Italian series. **Atmospheric Research**, v. 77, n. 1-4, p. 188–202, set. 2005.

CLEVELAND, W. S. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. **Journal of the American Statistical Association**, v. 74, n. 368, p. 829–836, 1979.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia**. Porto Alegre: IPH UFRGS, 2008. p. 151

CORDERY, I.; MEHROTRA, R.; NAZEMOSADAT, M. J. How reliable are standard indicators of stationarity? **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 21, n. 6, p. 765–771, 10 nov. 2006.

COSCARELLI, R.; CALOIERO, T. Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy (Calabria region). **Journal of Hydrology**, v. 416-417, p. 145–156, jan. 2012.

CULLOCH, M.; HUSTON, J. On Heteroscedasticity. **Econometrica**, v. 53, n. 2, p. 483, 1985.

DERECZYNSKI, C. P; PRISTO, M. V. J; CHOU, S. C; CAVALCANTI, I. F. A; ROZANTE, J. R. **Avaliação das Previsões do Modelo ETA na Região da Serra do Mar (Estado de São Paulo), Brasil** Rio de Janeiro Instituto de Geociências - UFRJ, 2010.

DETZEL, D. H. M. Geração de séries sintéticas de precipitação. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná, 2009.

DEVORE, J. L. **Probability and Statistics for Engineering and the Sciences**. Cengage Learning, 1991. p. 56

FILL, H. D. O. A. **Análise da estacionariedade das vazões do rio Iguaçu em União da Vitória**. Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 2011.

FILL, H. D. O. A.; MARQUES, M.; MANNICH, M. Análise de estacionariedade de vazões médias anuais com dependência em série. **XXV Congresso Latino Americano de Hidráulica**, p. 8, 2012.

FILL, H. D. O. A.; SUGAI, M.; HILU, A. Caracterização Climatológica da Região Metropolitana de Curitiba. **Engenharia e Construção**, v. 2, n. 28, 1999.

FILL, H. D.; OLIVEIRA, F. B.; SANTOS, P. **Avaliação de Cheias Considerando Distribuições Sazonais**. v. 13, p. 5–13, 2008.

FILL, H. D.; STEDINGER, J. R. Homogeneity tests based upon Gumbel distribution and a critical appraisal of Dalrymple's test. **Journal of Hydrology**, v. 166, n. 1-2, p. 81–105, mar. 1995.

FISCH, G.; FOLHES, M. T. Caracterização climática e estudo de tendências nas séries temporais de temperatura do ar e precipitação em Taubaté (SP). **Revista Ambiente e Água**, v. 1, n. 1, p. 11, 2006.

FU, G.; YU, J.; YU, X.; OUYANG, R.; ZHANG, Y.; WANG, P.; MIN, L. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961-2009. **Journal of Hydrology**, v. 487, p. 48–59, abr. 2013.

GARRIDO, J. E.; CAZORLA, E. A. D., CUARTERO, F., FERNÁNDEZ, I., GALLARDO, C. PROMESPAR: A Parallel Implementation Of The Regional Atmospheric Model PROMES. **Proceedings of the World Congress on Engineering**, v. 1, n. 1-3, p. 1–6, 2009.

GRAYSON, R. B.; ARGENT, R. M.; NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A.; MEIN, R. **Hydrological Recipes. Estimation techniques in Australian Hydrology**. Australia: Cooperative Research Center for Catchment Hydrology, 1996. p. 125

GROPPO, J. D.; MILDE, L. C. E.; GUAMERO, M. E.; MORAES J. M.; MARTINELLI, L. A. Análise de Séries Temporais de Vazão e de Precipitação na Bacia do Rio Piracicaba. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 8, n. 18, p. 109–117, 2001.

HENDERSON-SELLERS, A.; ROBINSON, P. J. **Contemporary Climatology**. London: Addison Wesley Longman, 1986.

HIRSCH, R. M.; SLACK, J. R. A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. **Water Resources Research**, v. 20, n. 6, p. 727–732, 1984.

HIRSCH, R. M.; SLACK, J. R.; SMITH, R. A. Techniques os Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. **Water Resources Research**, v. 18, n. 1, p. 107–121, 1982.

HOUGHTON, J.T.; MEIRA FILHO, L.G.; CALLANDER, B.A.; HARRIS, N.; KATTENBERG, A.; MASKELL, K. Climate Change 1995: Radiative Forcing of Climate Change and an evaluation of the IPCC 1992 Emission Scenarios. In: Cambridge: **Cambridge University Press**, 1995.

HYNDMAN, R. J.; KOEHLER, A. B. Another look at measures of forecast accuracy. **International Journal of Forecasting**, v. 22, n. 4, p. 679–688, out. 2006.

IBGE. **IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA** Rio de Janeiro, IBGE, 2013.

INMET. **INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA** INMET, 2013.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Cambridge: **Cambridge University Press**, 1995, 1997.

JOHNSON, J. **Econometric Methods**. 3rd. ed. New York: Mc Graw-Hill, Inc., 1984. p. 1–565

- KAC, M.; LOGAN, J. **Fluctuation Phenomena**. Amsterdam E.W. Montroll & J. L. Lebowitz, 1976.
- KENDALL, M. G.; STUART, A. **The Advanced Theory of Statistics**. American Statistical Association, 1963. v. 2p. 525–528
- KOTTEGODA, N. T.; ROSSO, R. **Applied statistics for civil and environmental engineers**. Milano: Blackwell Publishing, 2008. p. 737
- KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, v. 5, p. 89–97, 2005.
- KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. **Detecting trend and other changes in hydrological data**. Geneva: World Meteorological Association, 2000. p. 168
- LEANDER, R.; BUIHAND, T. A.; VAN DEN HURK, B. J. J. M.; DE WIT, M. J. M. Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. **Journal of Hydrology**, v. 351, n. 3-4, p. 331–343, abr. 2008.
- LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; WALLIS, J. R. Hydro-Climatological Trends in the Continental United States, 1948-88. **Journal of Climate**, v. 7, p. 586–607, 1994.
- LI, Z.; HE, Y.; WANG, C.; WANG, X.; XIN, H.; ZHANG, W.; CAO, W. Spatial and temporal trends of temperature and precipitation during 1960–2008 at the Hengduan Mountains, China. **Quaternary International**, v. 236, n. 1-2, p. 127–142, maio 2011.
- LIANG, L.; LI, L.; LIU, Q. Precipitation variability in Northeast China from 1961 to 2008. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1-2, p. 67–76, jun. 2011.
- LINDSTRÖM, G.; BERGSTRÖM, S. Runoff trends in Sweden 1807–2002 / Tendances de l'écoulement en Suède entre 1807 et 2002. **Hydrological Sciences Journal**, v. 49, n. 1, p. 69–83, fev. 2004.
- MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.
- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. **On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other**. Institute of Mathematical Statistics, 1947.
- MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e regionais: Avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 1, p. 1–18, 2001.
- MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J. Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia eastern Brazil, and northwestern Peru. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 2, p. 1775–1783, 1998.
- MATALAS, N. C. Stochastic hydrology in the context of climate change. **Climatic Change**, v. 37, p. 89–101, 1997.
- MEMÓRIA, J. M. P. Breve História da Estatística. **Embrapa**, v. 21, p. 116, 2004.

MESCHIATTI, M. C.; FONTOLAN, M. R.; HELENA, D.; FERREIRA, L. Caracterização estatística de tendências em séries anuais de dados hidro-climáticos no Estado de São Paulo. **Revista Geográfica Brasileira**, v. 6, n. 1, p. 52–64, 2012.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Riv. Meteor. Aeronautica**, v. 44, p. 195–202, 1984.

MINE, M. R. M.; FILL, H. D. O. A.; KAVISKI, E.; BESSA, M. R.; FERNANDES, C. V. S.; SANTOS, I.; CUNHA, L. M. **Water Resources in La Plata Basin in the context of Climate Change - Impact of the climate changes in hydropower. Partial report.** Curitiba, 2009

MINE, M. R. M. **Notas de Aula.** Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013

MOLION, L. C. B. **Desmitificando o aquecimento global.** Maceió. Universidade Federal de Alagoas, 2008.

MORAES, J. M.; GENOVEZ, A. M.; MORTATTI, J.; BALLESTER, M. V.; ALEX, V.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. Análise de intervenção das séries temporais de vazão dos principais rios da bacia do rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 65–79, 1997.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MÜLLER, I. I.; KRUGER, C. M.; KAVISKI, E. Análise de estacionariedade de séries hidrológicas na bacia incremental de Itaipu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 4, p. 51–71, 1998.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. DE A. **Hidrologia Estatística.** Belo Horizonte: CPRM Serviço Geológico do Brasil, 2007. p. 600

NELSON, E. **Quantum Fluctuations.** Princeton. Princeton University Press, , 1985.

NOTES, L.; KLAGES, R. **Introduction to Dynamical Systems.** 2008.

OGUNTUNDE, P. G.; ABIODUN, B. J.; LISCHIED, G. Rainfall trends in Nigeria, 1901–2000. **Journal of Hydrology**, v. 411, n. 3-4, p. 207–218, dez. 2011.

PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. **Probability, Random Variables and Stochastic Processes.** 4th. ed. New York: Mc Graw-Hill, Inc., 2002. p. 1–852

PEEL, M. C.; BLOSCHL, G. Hydrological modelling in a changing world. **Progress in Physical Geography**, v. 35, n. 2, p. 249–261, 31 mar. 2011.

PINTER, N.; PLOEG, R. R.; SCHWEIGERT, P.; HOEFER, G. Flood magnification on the River Rhine. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 1, p. 147–164, jan. 2006.

PINTO, N. L. S., HOLTZ A. C. T., MARTINS, J. A., GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica.** São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1976. p. 149

ROCHA, M. H. P. Verificação do potencial das RNA em reproduzir o processo chuva-vazão mensal com cenários de modelos climáticos regionais. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná, 2014.

ROMANO, E.; PETRANGELI, A. B.; PREZIOSI, E. Spatial and Time Analysis of Rainfall in the Tiber River Basin (Central Italy) in relation to Discharge Measurements (1920-2010). **Procedia Environmental Sciences**, v. 7, p. 258–263, jan. 2011.

RUMMUKAINEN, M.; RAISANEN, J.; BRINHFELT, B.; ULLERSTING, A.; OMSTEDT, A.; WILLEN, U.; JONES, C. A regional climate model for northern Europe: model description and results from the downscaling of two GCM control simulations. **Climate Dynamics**, v. 17, p. 339–359, 2001.

SALAS, J. D.; RAJAGOPALAN, B.; SAITO, L.; BROWN, C. Special Section on Climate Change and Water Resources: Climate Nonstationarity and Water Resources Management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 138, n. 5, p. 385–388, set. 2012.

SAURRAL, R. I. The Hydrologic Cycle of the La Plata Basin in the WCRP-CMIP3 Multimodel Dataset. **Journal of Hydrometeorology**, v. 11, n. 5, p. 1083–1102, out. 2010.

SAYEMUZZAMAN, M.; JHA, M. K. Seasonal and annual precipitation time series trend analysis in North Carolina, United States. **Atmospheric Research**, v. 137, p. 183–194, fev. 2014.

SHARMA, K. P.; MOORE, B.; VOROSMARTY, C. J. Anthropogenic, climatic, and hydrologic trends in the Kosi basin, Himalaya. **Climatic Change**, v. 47, p. 141–165, 2000.

SILVEIRA, A. L. L. **Simulação Hidrológica Estocástica. Apostila da disciplina Séries Temporais Hidrológicas e Ecológicas**. Porto Alegre: IPH UFRGS, 2000.

STEYAERT, L. T.; GOODCHILD, M. F. **Integrating geographic information systems and environmental simulation models: A status review**, 1993.

STIPP, R. D.; BUCHIR, L. M. S. T.; MINE, M. R. M. Tendência sazonal da precipitação na bacia do Iguaçu. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 8, 2013.

STURGES, H. A. The Choice of a Class Interval. **Journal of the American Statistical Association**, v. 21, n. 3, p. 65–66, 1926.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, v. 456-457, p. 12–29, ago. 2012.

TOZZI, B. K. M. Verificação da Estacionariedade de Séries Hidrológicas de Vazões na Bacia do Rio Iguaçu. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná, 2014.

TROGER, F. H. **Verificação da estacionariedade das séries anuais de vazões naturais das usinas hidrelétricas de Três Marias e Sobradinho**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

TROGER, F. H.; PANTE, A. R. **Análise de estacionariedade em séries de vazões naturais médias anuais de estações da bacia do Rio Tapajós**. Brasília. Agência Nacional das Águas, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos**. Brasília: 2002, p. 150

VARGAS, D. M.; ARENA, L. F. G. L.; SONCINI, A. S. Tendência secular do crescimento em estatura em Blumenau - Brasil e sua associação com o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). **Revista da Associação Médica Brasileira**, v. 56, n. 3, p. 304–308, 2010.

WANG, W.; CHEN, X.; SHI, P.; GELDER, P. H. A. J. M. VAN. Detecting changes in extreme precipitation and extreme streamflow in the Dongjiang River Basin in southern China. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 12, p. 207–221, 2008.

WATANABE, S.; KANAE, S.; SETO, S.; YEH, P. J.-F.; HIRABAYASHI, Y.; OKI, T. Intercomparison of bias-correction methods for monthly temperature and precipitation simulated by multiple climate models. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. D23114, p. 1–13, 13 dez. 2012.

XU, Z. X.; TAKEUCHI, K.; ISHIDAIRA, H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation. **Journal of Hydrology**, v. 279, n. 1-4, p. 144–150, ago. 2003.

YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. **Journal of Hydrology**, v. 259, n. 1-4, p. 254–271, mar. 2002.





## APÊNDICES